Digitized by Google

18608.

4ot 18608

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK GENT

900000081

Digitized by Google

Digitized by Google

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE.

Digitized by Google

Digitized by Google

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE,

PAR E. PÉCLET,

MAÎTRE DE CONFÉRENCES DE PHYSIQUE A L'ÉCOLE NORMALE,
PROFESSEUR DE PHYSIQUE A L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES.

Ouvrage autorisé

PAR LE CONSEIL ROYAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE.

QUATRIÈME ÉDITION ENTIÈREMENT REFONDUE.

TOME SECOND.

Bruxelles,

SOCIÉTÉ TYPOGRAPHIQUE BELGE,

ADOLPHE WAHLEN ET COMPAGNIE.

MÉDECINE ET SCIENCES ACCESSOIRES. — H. DUMONT, GÉRANT.

1838

Digitized by Google

Digitized by Google

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE.

SECONDE PARTIE.

FLUIDES IMPONDÉRABLES.

(SUITE.)

CHAPITRE II.

MAGNÉTISME.

§ 1er. *Phénomènes généraux.*

796. La plupart des mines de fer dans lesquelles ce métal n'est pas au maximum d'oxidation jouissent de la propriété d'attirer le fer, le nickel et le cobalt. On les désigne sous le nom d'*aimants naturels* ou *pierres d'aimants*.

797. Lorsqu'on plonge un aimant dans la limaille de fer, elle s'y attache; lorsqu'on la présente à une certaine distance, elle s'élance sur lui. L'attraction se manifeste également malgré l'interposition d'un corps quelconque, dans le vide comme dans l'air. On peut facilement constater l'action des aimants dans ces différentes circonstances en suspendant un fil de fer par son milieu à un fil de soie, et lui présentant à distance, et derrière un corps quelconque, un aimant naturel, ou en plaçant ce petit appareil sous une cloche dans laquelle on fait le vide.

La propriété des aimants d'attirer le fer a été connue des Grecs. C'est même du nom grec des aimants (μαγνης) que dérive le nom de *magnétisme*, que porte l'ensemble des phénomènes dont il s'agit. Les premières notions qui nous ont été transmises sur le magnétisme viennent de Pythagore; mais il paraît que ces connaissances remontent chez les Chinois à une époque beaucoup plus reculée.

798. *Pôles.* En observant un aimant après qu'il a été roulé dans la limaille de fer,

Digitized by Google

on trouve que ce métal ne s'est pas fixé uniformément sur sa surface, et qu'il s'est plus particulièrement ramassé autour de deux points opposés, où la vertu magnétique paraît principalement résider, et qu'on a désignés sous le nom de *pôles*. En présentant successivement les différents points d'un aimant à l'aiguille de fer dont nous venons de parler, on reconnaît de même que le maximum d'attraction a lieu vers les extrémités. A partir des pôles, l'action va en s'affaiblissant à mesure qu'on s'approche du centre de l'aimant, où l'action est nulle; la ligne de la surface de l'aimant où l'action magnétique est insensible porte quelquefois le nom de *ligne neutre*.

799. Si l'on suspend un aimant naturel par un fil, de manière que la ligne qui passe par les pôles soit horizontale (*fig.* 453), on remarque que, l'aimant étant libre, la ligne des pôles se dirige à peu près parallèlement au méridien; si on la dérange de cette position, elle y revient en faisant des oscillations plus ou moins nombreuses.

800. Lorsqu'on approche deux aimants dont l'un est suspendu comme nous venons de le dire, on observe qu'un même pôle de l'un d'eux attire un des pôles du second aimant et repousse l'autre; que les pôles qui se repoussent sont ceux qui se dirigent naturellement ou tous deux vers le nord, ou tous deux vers le sud, et que ceux qui s'attirent sont au contraire ceux qui dans chaque aimant isolé se tournent vers des points opposés de l'espace. Il résulte de là que dans les aimants les pôles de même nature se repoussent, et que ceux de nature différente s'attirent. On peut expliquer la tendance de la ligne des pôles d'un aimant à se diriger parallèlement au méridien en regardant la terre comme un aimant dont les pôles magnétiques sont situés l'un dans l'hémisphère boréal, l'autre dans l'hémisphère austral. Le pôle boréal d'un aimant sera alors celui qui se tourne vers le sud, et son pôle austral celui qui se dirige vers le nord.

801. Lorsqu'on brise un aimant naturel en deux parties, de manière que dans chacune d'elles se trouve un des pôles de l'aimant entier, chacune d'elles acquiert un nouveau pôle opposé au premier; et en général, quand on brise un aimant naturel en un nombre quelconque de parties, chaque fragment devient un aimant complet possédant deux pôles.

802. *Communication de la vertu magnétique.* Lorsqu'on plonge un aimant dans de la limaille de fer, les parcelles de fer qu'il entraîne sont placées les unes à la suite des autres (*fig.* 454). Ce fait ne peut s'expliquer qu'en admettant que chaque parcelle de fer devient magnétique par son contact direct avec l'aimant ou avec la parcelle métallique qui la précède. C'est d'ailleurs ce que l'on peut vérifier en suspendant à un aimant un petit fil de fer doux (*fig.* 455) : son extrémité libre acquiert un pôle de même nature que celui de l'aimant auquel l'autre extrémité est fixée, et peut soutenir un second fil de fer qui présente les mêmes phénomènes; mais chacun de ces fils ne reste magnétique qu'autant qu'il est fixé à l'aimant; aussitôt qu'il en est détaché, il cesse d'attirer le fer. Ce fait est encore rendu plus évident par les expériences suivantes.

Si l'on prend deux lames d'acier AB et $A'B'$ (*fig.* 456) égales et également aimantées, et si on suspend un fil de fer doux ab à l'une d'elles, en approchant l'autre par un pôle contraire, quand la distance devient très-petite, le fil ab se détache et tombe, parce que les deux pôles contraires des aimants produisent sur l'extrémité du fil de fer des effets opposés qui se détruisent. Si les lames avaient une grande épaisseur, il faudrait évidemment que la lame supérieure fût plus puissante que l'autre pour que le même effet fût produit. Il est facile de voir que, si la force du barreau supérieur excédait de beaucoup celle du barreau inférieur, le fil pourrait être soutenu par l'action du barreau supérieur.

Digitized by Google

Si on suspend deux fils de fer doux *ab* et *a'b'* (*fig.* 457) à deux fils de soie et qu'on les approche d'un aimant, ils s'écartent quand ils n'en sont plus qu'à une petite distance.

803. Un aimant naturel agit aussi sur l'acier, la fonte de fer, ou sur le fer uni avec une petite quantité de phosphore, d'arsenic ou d'étain. Ces corps acquièrent plus difficilement la faculté magnétique que le fer doux, mais ils la conservent. Le nickel et le cobalt sont dans le même cas que le fer : comme lui, ils conservent leur polarité lorsqu'ils sont combinés avec une petite quantité de charbon, de soufre, de phosphore, d'arsenic ou d'étain ; mais, sous le même volume et la même forme, le fer est plus magnétique que le nickel et le cobalt.

Ainsi, parmi les substances magnétiques, il faut bien distinguer celles qui sont simplement magnétiques et celles qui sont aimantées. Les premières sont toujours attirées par les deux pôles d'un aimant; les autres ont toujours deux pôles qui sont attirés par ceux de noms différents, et repoussés par ceux de mêmes noms des aimants auxquels on les soumet.

804. L'acier et les autres métaux magnétiques n'éprouvent aucune augmentation ni diminution de poids par l'aimantation : il s'ensuit que la vertu magnétique n'est pas due à un corps pondérable. Dans l'aimantation, la cause, quelle qu'elle soit, qui produit la vertu magnétique, ne passe pas de l'aimant à l'acier : car l'aimant après son action n'a rien perdu de sa force. Le caractère essentiel de la cause du magnétisme est donc d'être impondérable, et de n'être pas transmissible.

805. On appelle *aimants artificiels* des barreaux d'acier auxquels on a communiqué la vertu magnétique par des aimants naturels ou par d'autres aimants artificiels. Les aimants artificiels se comportent exactement, et dans toutes les circonstances, comme les aimants naturels; et comme ils se prêtent à toutes les formes possibles, on peut s'en servir pour observer avec précision les phénomènes de direction que nous avons reconnus dans les aimants naturels. Une aiguille aimantée a ordinairement la forme d'un losange (*fig.* 458); elle est garnie à son centre d'une petite chappe en cuivre ou en agathe, au moyen de laquelle on la suspend sur un pivot (*fig.* 459).

806. *Déclinaison.* Lorsqu'on suspend une aiguille aimantée sur une pointe ou par un fil, ou qu'on la place sur un corps flottant à la surface d'un liquide, on remarque, comme nous l'avons déjà dit, qu'une des extrémités se dirige sensiblement vers le nord. Mais la direction de l'aiguille ne coïncide pas avec le méridien géographique : l'angle formé par la direction de l'aiguille avec celle du méridien porte le nom de *déclinaison*. Cet angle varie de grandeur et de position suivant les lieux, et dans le même lieu avec le temps. La déclinaison est maintenant à Paris d'environ 22° ouest. Dans un même lieu, les aiguilles aimantées qui sont assez distantes pour ne pas réagir l'une sur l'autre prennent des directions sensiblement parallèles. On désigne sous le nom de *méridien magnétique* le plan qui passe par le centre de la terre et par la direction de l'aiguille horizontale.

807. *Inclinaison.* Lorsqu'on suspend une aiguille non aimantée par un axe horizontal passant par son centre de gravité (*fig.* 460), elle reste en équilibre dans toutes les positions possibles; mais si, après l'avoir aimantée, on la dirige dans le méridien magnétique, l'aiguille prend une position dans laquelle elle reste en équilibre stable. Le plus petit des deux angles formés par la direction de l'aiguille avec la ligne horizontale porte le nom d'*inclinaison*. L'inclinaison est maintenant à Paris d'environ 70°, et c'est le pôle austral (800) qui s'abaisse au-dessous de l'horizon.

808. *Isochronisme des oscillations d'une aiguille aimantée, soumise à l'action seule de la terre.* Lorsqu'une aiguille aimantée, suspendue sur une pointe fine ou à un fil de cocon, est très-peu dérangée de sa position d'équilibre, elle y revient

Digitized by Google

en faisant autour de cette position des oscillations isochrones, comme celles d'un pendule dérangé de sa position verticale. Il résulte de ce fait que les forces qui sollicitent l'aiguille sont à chaque instant proportionnelles à l'angle d'écart (58), et, par suite, qu'elles ont à chaque instant une direction constante : car alors les composantes de ces forces, perpendiculaires à la direction de l'aiguille, sont proportionnelles au sinus de la déviation, ou à l'angle de déviation même quand elle est très-petite.

Cette conséquence de l'isochronisme des oscillations des aiguilles aimantées a d'ailleurs été constatée directement par l'expérience au moyen de la balance de torsion (125). En fixant à l'extrémité du fil une aiguille aimantée, de manière qu'elle soit dans le méridien magnétique quand le fil est sans torsion, et en tournant le fil du micromètre de manière à faire prendre à l'aiguille différentes positions, on trouve que l'angle de torsion est proportionnel à l'angle de déviation.

809. *Les forces provenant du magnétisme terrestre qui sollicitent une même aiguille aimantée sont égales, parallèles et opposées, et ne peuvent lui imprimer aucun mouvement de translation.* En effet, si l'action magnétique du globe pouvait imprimer un mouvement de translation à une aiguille aimantée, ce serait en vertu d'une force qu'on pourrait toujours décomposer en deux, l'une verticale, l'autre horizontale. La première pourrait se reconnaître et se mesurer en pesant une aiguille avant et après l'aimantation : la différence de poids serait exactement la mesure de la composante verticale. Or on ne trouve point de différence : donc la composante verticale est nulle. Quant à la composante horizontale, si elle existait, on la reconnaîtrait facilement au moyen de l'appareil (*fig.* 461), dans lequel l'aiguille *ab* est placée à l'extrémité d'une lame non magnétique *MN* librement suspendue par un fil de soie. On voit à l'inspection de la figure que, s'il existait une force de translation horizontale, l'aiguille ne prendrait pas la même direction que si elle était suspendue par son centre; or on ne trouve aucune différence.

810. Il résulte de tout ce qui précède que, si une aiguille aimantée était librement suspendue par son centre de gravité, de manière à pouvoir prendre toutes les positions possibles autour de ce point, cette aiguille, étant sollicitée par des forces égales, parallèles et opposées, appliquées à deux points voisins des extrémités, prendrait nécessairement la direction de ces forces; mais si l'aiguille n'était point suspendue par son centre de gravité, le poids de l'aiguille se combinerait avec les forces magnétiques pour déterminer sa position d'équilibre. Si l'aiguille était suspendue horizontalement, de manière qu'elle ne pût se mouvoir qu'autour d'un axe vertical, elle se dirigerait dans le méridien magnétique; elle serait alors seulement sollicitée par les composantes horizontales du magnétisme terrestre. Si l'aiguille était assujettie à se mouvoir dans un même plan vertical, ce qui arriverait si elle était mobile autour d'un axe fixe horizontal, elle ne serait plus sollicitée que par les composantes dirigées suivant ce plan : par conséquent elle se dirigerait suivant la projection des forces magnétiques terrestres sur ce plan. Il est facile de voir d'après cela que l'inclinaison de l'aiguille sera d'autant plus grande que l'angle du plan avec le méridien magnétique sera plus considérable; et que, quand ce plan sera perpendiculaire au méridien magnétique, l'aiguille deviendra verticale. On peut facilement déduire de là que, si l'aiguille ne pouvait se mouvoir que dans un plan perpendiculaire à la direction des forces du magnétisme terrestre, elle resterait en équilibre dans toutes les positions possibles.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que l'aiguille était mobile autour de son milieu; les résultats seraient encore les mêmes si l'aiguille était mobile autour d'un autre point de son plan. Par exemple, si l'aiguille (*fig.* 462) était fixée à l'extrémité

Digitized by Google

d'une tige non magnétique *MN* librement suspendue, l'action du globe ferait tourner la tige de manière à amener l'aiguille dans le méridien magnétique. En effet, en désignant par *m* et *n* les centres magnétiques des deux moitiés de l'aiguille, les forces appliquées à ces points sont égales, parallèles, et tendent à faire tourner l'aiguille *ab* autour du point *o* dans des sens opposés; mais comme elles sont appliquées à des distances inégales de ce point, on voit que l'aiguille tournera jusqu'à ce qu'elle soit parallèle à la direction des forces. Il est facile de voir qu'il en serait de même si l'aiguille, au lieu d'être placée sur le prolongement *MN*, avait toute autre direction relativement à cette tige, excepté pourtant le cas où l'aiguille serait verticale (*fig.* 463): car alors, les mouvements de rotation étant égaux dans toutes les positions possibles, l'aiguille pourrait rester en équilibre dans une position quelconque.

§ II. *Lois des attractions et des répulsions magnétiques.*

811. Les attractions et les répulsions magnétiques suivent exactement la raison inverse des carrés des distances. On doit à Coulomb la découverte de ce fait important; c'est au moyen de la balance de torsion (125) qu'il parvint à la mettre en évidence. Coulomb plaça à l'extrémité du fil de suspension (*fig.* 464) un étrier dans lequel il introduisit d'abord une tige non magnétique, pour mettre la ligne de repos correspondante au zéro de la division du micromètre sur celui de la cage; et pour placer cette ligne de repos dans le méridien magnétique, il remplaça la tige non magnétique par une aiguille aimantée, et tout l'appareil fut tourné jusqu'à ce que la position d'équilibre de l'aiguille correspondît au zéro de la division.

Alors Coulomb commença par déterminer la force directrice de l'aiguille, c'est-à-dire la force qu'il fallait employer pour la maintenir à une certaine distance angulaire du méridien magnétique. Pour cela il tordit le fil de suspension, en faisant tourner l'aiguille du cadran *ab*: pour chaque distance angulaire la force directrice était évidemment représentée par le nombre de degrés parcourus par l'aiguille du micromètre, diminués de la déviation de l'aiguille. Coulomb reconnut alors, comme nous l'avons déjà dit, que la force directrice était proportionnelle au sinus de la déviation, ou à la déviation elle-même quand elle est très-petite. Cette loi peut d'ailleurs se déduire du seul fait que l'action exercée par la terre sur les pôles d'une aiguille a une direction constante : car une aiguille magnétique qui oscille dans un plan quelconque est exactement dans le même cas qu'un pendule soumis à l'influence de la pesanteur.

Coulomb fixa ensuite dans la cage de la balance et dans une position verticale un barreau aimanté, dont le pôle placé à la hauteur de l'aiguille était de même nom que le pôle voisin de cette dernière. L'aiguille horizontale fut repoussée, et en tordant le fil de suspension par l'index du micromètre, il rapprocha les aimants à différentes distances. Pour chacune d'elles la force répulsive était égale à la torsion du fil augmentée de la force directrice : alors, en comparant ces forces aux distances, la loi énoncée fut mise en évidence. Nous rapporterons une des séries d'expériences faites par Coulomb.

L'aiguille mobile avait 15 pouces de long, 1 ligne et demie de diamètre; la force directrice pour 1° était de 35° de torsion, et les distances des deux aimants étaient de 24°, 17° et 12°, pour les torsions micrométriques de 0°, 3 circonférences et 8 circonférences. Les forces directrices étaient donc, dans ces trois expériences, de $24 \times 35 = 840$, de $17 \times 35 = 595$ et de $12 \times 35 = 420$, et les torsions étaient 24°, $17 + 3 \times 360 = 1097$ et $12 + 360 \times 8 = 2892$; et par conséquent les forces qui faisaient équilibre aux répulsions étaient $24 + 840$, $595 + 1097$ et $420 + 2892$, ou

Digitized by Google

864, 1692, 2313; or ces nombres sont sensiblement dans le rapport inverse des carrés des nombres 24, 17, 12, qui mesurent les distances des pôles des aimants : car, pour de petits angles, on peut prendre les arcs pour les cordes.

812. Les lois des attractions et des répulsions magnétiques pourraient aussi être déterminées en faisant osciller une aiguille sous l'influence d'un aimant que l'on placerait successivement à diverses distances de l'aiguille; mais il faudrait encore avoir égard à l'influence du magnétisme terrestre. Nous exposerons en détail cette méthode, en parlant de la mesure de la force magnétique des aimants.

Dans toutes ces expériences, on doit toujours choisir des aimants très-longs, afin de pouvoir négliger l'action des pôles les plus éloignés, et on doit les prendre en acier fortement trempé, pour que l'action mutuelle des aimants ne puisse développer de nouveau magnétisme dans aucun d'eux.

§ III. *Détermination de la force magnétique des aimants.*

813. La méthode qui paraît la plus simple et la plus directe pour comparer la force des aimants naturels et artificiels est de les mettre en contact avec une même pièce de fer, supportant une coupe de balance que l'on charge successivement jusqu'à ce qu'elle se détache de l'aimant; mais cette méthode ne peut donner qu'une approximation grossière. Elle fut cependant la seule usitée jusqu'en 1780, époque à laquelle Coulomb y substitua d'autres méthodes susceptibles d'une grande précision, mais qui ne sont applicables qu'à la détermination du magnétisme d'une même aiguille ou d'aiguilles égales. On peut mesurer la force des aimants par la méthode des oscillations ou par la balance de torsion.

814. *Méthode des oscillations.* Si on suspend une aiguille aimantée à un fil sans torsion, et qu'on écarte l'aiguille du méridien magnétique, nous avons vu qu'elle oscille autour de cette position; alors l'intensité de la force qui la sollicite est proportionnelle, comme dans le pendule, au carré du nombre d'oscillations qu'elle fait dans le même temps.

En désignant par F la composante horizontale de l'intensité magnétique de la terre, par F' et F'' les intensités magnétiques d'une même aiguille dans deux circonstances différentes, par T et T' les durées des oscillations, et par n, n', les nombres d'oscillations exécutées par l'aiguille dans le même temps, les forces qui solliciteront l'aiguille seront proportionnelles à FF' dans le premier cas et à FF'' dans le second; et, comme les éléments magnétiques de l'aiguille sont sollicités par des forces parallèles qui restent constantes, ces oscillations suivent des lois analogues à celles d'un pendule soumis à l'action de la pesanteur : alors, en remplaçant dans l'équation du pendule (58) la valeur de g par KFF' et KFF'', K étant un nombre constant, on trouve

$$\frac{F'}{F''} = \frac{T'^2}{T^2} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

815. Lorsque l'aimant ne peut pas être suspendu, on le fait agir, dans ses différents états magnétiques, sur une même aiguille suspendue horizontalement, à la même distance; il faut que l'aiguille ait été fortement trempée, afin que son état magnétique ne soit point changé d'une manière permanente par l'influence de l'aimant. On commence d'abord par faire osciller l'aiguille sous l'influence seule de la terre, et ensuite sous l'influence réunie de la terre et de l'aimant, l'aimant étant placé dans le méridien magnétique; on déduit alors facilement des nombres d'oscillations faites dans le même temps les rapports d'intensité du magnétisme de l'aimant.

Digitized by Google

En désignant, comme précédemment, par F la composante horizontale du magnétisme terrestre, par F' et F'' les intensités du magnétisme de l'aimant dans deux états différents, par f celle de l'aiguille, par k et k' deux coefficients constants, par n, n', n'', les nombres d'oscillations de l'aiguille libre, et soumise successivement à l'influence de la terre et de l'aimant dans ces deux états, nous aurons les équations

$$\frac{kFf + k'F'f}{kFf} = \frac{n'^2}{n^2} \quad \text{et} \quad \frac{kFf + k'F''f}{kFf} = \frac{n''^2}{n^2}.$$

La première donne

$$k'F'f = kFf\left(\frac{n'^2 - n^2}{n^2}\right),$$

la seconde

$$k'F''f = kFf\left(\frac{n''^2 - n^2}{n^2}\right);$$

d'où l'on tire

$$\frac{k'F'f}{k'F''f} = \frac{F'}{F''} = \frac{n'^2 - n^2}{n''^2 - n^2}.$$

La même méthode peut servir à vérifier les lois des attractions et des répulsions magnétiques; il suffit pour cela de faire varier la distance du barreau aimanté, son intensité restant constante.

Dans ce cas, $F' = F''$; mais la distance du barreau à l'aiguille étant différente, la force qui sollicite l'aiguille est représentée par $k'F'f$ et $k''F''f$, k' et k'' étant des coefficients différents qui dépendent de la distance : alors on a

$$\frac{k'}{k''} = \frac{n'^2 - n^2}{n''^2 - n^2},$$

et on trouve par l'observation que k' et k'' sont en raison inverse du carré de la distance. Nous rapporterons une des expériences de Coulomb.

Il suspendit une petite aiguille à un fil de soie, et, à l'abri des agitations de l'air, elle faisait 15 oscillations par minute. Il fit ensuite agir sur elle le pôle attractif d'un long fil d'acier fortement aimanté et maintenu verticalement dans le méridien magnétique de l'aiguille; l'extrémité du fil d'acier qui agissait sur l'aiguille s'abaissait de 10 lignes environ au-dessous du plan horizontal de l'aiguille; cette disposition était nécessaire pour obtenir le maximum d'effet : le fil étant à 4 pouces de distance du centre de l'aiguille, elle fit 41 oscillations en 1 minute, et, le fil étant placé à 8 pouces, le nombre des oscillations fut réduit à 24. D'après la formule précédente on a

$$\frac{k'}{k''} = \frac{(41)^2 - (15)^2}{(24)^2 - (15)^2} = 4{,}1.$$

Ainsi, à une distance double, l'intensité de la force est 4 fois plus petite.

816. On peut aussi déterminer le rapport des intensités magnétiques d'une même aiguille au moyen de la balance de Coulomb, en mesurant la torsion qu'il faut donner au fil de suspension pour que l'aiguille éprouve la même déviation. En supposant que les pôles soient toujours aux mêmes points, il est facile de voir que les intensités magnétiques de l'aiguille sont proportionnelles aux arcs de torsion.

Digitized by Google

§ IV. *Distribution du magnétisme dans un barreau aimanté.*

817. Lorsqu'on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on remarque, comme nous l'avons déjà dit, que la limaille s'attache surtout à ses extrémités : il en résulte que la vertu magnétique réside principalement dans les points voisins des extrémités.

818. On peut déterminer la distribution du magnétisme dans un barreau par le procédé suivant. On prend une très-petite aiguille, et, après avoir déterminé le nombre des oscillations qu'elle fait dans une minute, lorsqu'elle est soumise à l'influence seule de la terre, on la présente successivement aux différents points d'un barreau aimanté *AB* (*fig.* 465). On détermine pour chaque position le nombre d'oscillations qu'elle fait dans le même temps, et, par suite, l'intensité du magnétisme qui concourt avec l'action de la terre pour faire osciller l'aiguille : cette intensité est proportionnelle à celle du point de la barre situé dans le plan horizontal de l'aiguille. En effet, le point *M*, situé à la hauteur de l'aiguille *ab*, sera celui dont l'action se fera sentir davantage : d'abord parce qu'il est le plus voisin de l'aiguille, ensuite parce qu'il l'attire directement dans le plan horizontal où elle oscille, au lieu que les autres points situés au-dessus et au-dessous agissent de plus loin et plus obliquement. A la vérité, l'influence de ces deux causes est très-faible pour les points du barreau qui avoisinent *M*; mais si l'action d'un de ces points est plus forte que celle de *M*, celle du point situé de l'autre côté, à la même distance, sera plus faible d'une quantité à peu près égale : car, quelle que soit la nature de la courbe *A'B'C'*, dont les ordonnées représentent les intensités magnétiques qui correspondent aux différents points de l'aiguille, on peut toujours, lorsqu'on n'en considère qu'une très-petite étendue, lui substituer la ligne droite qui la toucherait. Ainsi, la demi-somme des actions équidistantes exercées par les points voisins de *M* sera encore très-peu différente de celle de *M*. Il suit de là que, dans chaque expérience, le barreau exercera une action presque proportionnelle à celle du point *M*; mais cette proportionnalité ne pourra pas s'étendre jusqu'à l'extrémité du barreau, ni même à une très-petite distance de cette extrémité : car alors les points situés au delà devenant assez voisins pour que leur absence soit sensible, l'action exercée sur l'aiguille ne serait plus la même que si le barreau était continué. A l'extrémité du barreau la force est à peu près deux fois plus petite que s'il était prolongé : c'est pourquoi il faut doubler les résultats obtenus. Dans ces expériences, l'aiguille doit être assez forte pour que son état magnétique ne soit pas changé d'une manière permanente par l'influence du barreau.

819. On pourrait aussi employer la balance de torsion. Coulomb se servait, pour ce mode d'expérience, de l'appareil (*fig.* 464). L'aiguille aimantée mobile étant sur le zéro de la division et dans le méridien magnétique, il fixait verticalement dans la cage et contre cette aiguille, dans sa position d'équilibre, une règle de bois de 2 millimètres d'épaisseur, et il plaçait contre cette règle, et de l'autre côté un barreau vertical, dont le pôle de même nom que celui de l'extrémité la plus voisine de l'aiguille était à la hauteur de cette aiguille ; en faisant glisser le barreau verticalement contre la règle, on amenait successivement ses différents points en regard du pôle de l'aiguille, et dans chaque position elle était écartée de sa direction d'un angle plus ou moins considérable ; alors, au moyen du micromètre, on la ramenait à sa position initiale, et la force de répulsion était mesurée par la torsion nécessaire pour produire cet effet. Pour diminuer le nombre des oscillations, Coulomb employait un petit étrier en cuivre (*fig.* 466), terminé inférieurement par une lame de cuivre qui plongeait dans

Digitized by Google

un vase plein d'eau. Il faudrait encore, comme dans la méthode précédente, doubler l'intensité obtenue à l'extrémité, puisqu'on obtiendrait un effet sensiblement double si l'aimant se prolongeait au delà.

820. Coulomb a fait un grand nombre d'expériences pour déterminer la variation de la force magnétique dans les différents points d'un barreau aimanté; il a trouvé qu'en général la force magnétique était nulle au milieu; que de là elle croissait très-lentement jusqu'à une certaine distance, d'où elle augmentait avec une très-grande rapidité jusqu'aux extrémités, et qu'à distances égales du centre, les forces magnétiques étaient égales, mais de nature contraire. Dans une des expériences, le fil aimanté avait 27 pouces de longueur sur 2 lignes de diamètre; à 6 pouces des extrémités la force magnétique était équivalente à une torsion de 6°, et croissait jusqu'à l'extrémité où elle était représentée par une torsion de 165°. La courbe *abcb'a'* (*fig.* 467) indique la distribution du magnétisme dans une aiguille; l'intensité magnétique de chaque point est représentée par l'ordonnée qui passe par ce point.

821. Pour les fils et les lames d'une longueur différente, dont les dimensions transversales sont égales, mais très-petites relativement à la longueur, et qui sont régulièrement aimantées, la courbe qui représente les intensités magnétiques est exactement la même, pourvu que la longueur surpasse 6 ou 8 pouces. Il résulte de là qu'au-dessus de 6 ou 8 pouces tous les aimants prismatiques d'une petite section ont leurs pôles à la même distance des extrémités : car les pôles n'étant que les points d'application des résultantes totales, ces points sont placés de la même manière quand les composantes partielles suivent la même loi. Coulomb a fait voir que ces pôles se trouvent à 18 lignes des extrémités. Pour les aimants prismatiques très-courts, les pôles sont à peu près au tiers de la demi-longueur, en partant des extrémités; ce dernier résultat est une limite dont les pôles s'approchent de plus en plus à mesure que la longueur de l'aimant diminue. D'après M. Becquerel, la distribution du magnétisme dans les fils d'acier très-fins suit les mêmes lois.

Quand l'aiguille n'est pas prismatique, les lois précédentes ne sont point applicables; dans les aiguilles en losange les pôles se rapprochent du centre.

822. *Points conséquents.* Quand les aiguilles ou les barreaux ont une très-grande longueur, ils renferment quelquefois un certain nombre de pôles intermédiaires à ceux qui existent aux extrémités : ces pôles intermédiaires sont désignés sous le nom de *points conséquents.* D'après Coulomb il s'en forme toujours dans les aiguilles d'acier trempé dont la longueur excède 30 fois le diamètre.

On peut facilement reconnaître leur présence et leur position en plongeant l'aiguille dans de la limaille de fer : elle se fixe sur tous les pôles. La figure 468 représente une aiguille renfermant un point conséquent; la figure 469 une aiguille qui en contient deux. Au-dessous des aiguilles on a tracé la courbe qui représente la distribution du magnétisme. On peut aussi reconnaître la présence des points conséquents en plaçant le barreau verticalement et en approchant une aiguille d'épreuve que l'on fait monter parallèlement à elle-même, de manière à la présenter successivement en face de chaque point du barreau; si le barreau n'a pas de points conséquents on n'observe qu'une attraction et une répulsion; s'il y a un point conséquent on observe deux alternatives, etc. En parlant de l'aimantation nous verrons la cause de la formation des points conséquents et les moyens de les éviter : car leur présence dans les aiguilles de boussoles diminue leur force directrice, et dans certaines circonstances peut les rendre complétement inexactes.

Digitized by Google

§ V. *Théorie du magnétisme.*

823. Pour expliquer les phénomènes magnétiques on admet l'existence de deux fluides impondérables, désignés sous les noms de *fluide austral* et de *fluide boréal*, dont les molécules similaires se repoussent, et celles de nature différente s'attirent. Ces deux fluides existent à l'état de combinaison dans tous les corps magnétiques, et sont séparés par une action magnétique étrangère; mais comme les aimants ne perdent point de leur intensité magnétique en la développant dans d'autres corps, il s'ensuit que les fluides magnétiques ne sortent pas des corps; et comme des fragments quelconques d'un aimant sont des aimants complets, il est extrêmement probable qu'il en est de même de chaque molécule, et par conséquent que dans l'aimantation la séparation des fluides a lieu seulement dans chaque molécule.

824. Sans établir aucune hypothèse sur la nature des fluides magnétiques, mais en partant de la loi de Coulomb et de la supposition que dans leur séparation les fluides ne parcourent qu'un espace infiniment petit, M. Poisson est parvenu à trouver les conditions d'équilibre des fluides magnétiques dans les aimants, et les formules qui expriment leur action sur un point extérieur. Dans quelques cas particuliers, où ces formules étaient intégrables, M. Poisson en a déduit des résultats qui ont été pleinement confirmés par l'expérience. Nous allons entrer à cet égard dans quelques détails. M. Poisson considère chaque point d'un corps magnétique à l'état naturel comme renfermant les deux fluides à l'état de combinaison, qui est maintenue par une force d'intensité variable, désignée sous le nom de *force coercitive*. Par l'action d'un aimant étranger les deux fluides se séparent, s'éloignent à une distance très-petite, y restent par la force inconnue qui empêche les fluides magnétiques de sortir des corps dans lesquels ils ont été développés; mais si le corps est soustrait à l'influence qui a séparé les deux fluides, il rentre dans l'état primitif ou conserve celui qu'il a reçu, en totalité ou en partie, suivant que la force coercitive du corps sera nulle, ou sera plus ou moins grande. En un mot, on considère les aimants et les corps susceptibles de recevoir l'influence magnétique, comme formés d'un grand nombre de petits corps qui jouissent individuellement des mêmes propriétés que la masse dont ils font partie. M. Poisson appelle *éléments magnétiques* les espaces dans lesquels les fluides magnétiques s'étendent par leur séparation, et *lignes magnétiques* les lignes, droites ou courbes, qui sont formées par les lignes polaires des éléments magnétiques.

Lorsqu'un corps sans force coercitive est soumis à l'influence d'un centre magnétique extérieur ou intérieur, dans l'état d'équilibre la résultante de toutes les actions attractives ou répulsives sur un élément doit être égale à zéro. Mais dans le cas où le corps a une force coercitive quelconque, la résultante doit seulement être plus petite que cette force, car autrement il se développerait un nouveau magnétisme. Enfin, dans le cas où le corps serait aimanté à saturation, il faudrait, pour que l'équilibre existât, que la résultante totale, pour un point quelconque, fût égale à la force coercitive. De là le moyen de trouver les équations d'équilibre dans chaque cas particulier. M. Poisson a constaté que la résultante des actions de tous les éléments magnétiques d'un aimant était équivalente à l'action d'une couche magnétique très-mince qui recouvrirait la surface du corps, et qui serait formée de deux fluides, boréal et austral, qui en occuperaient les parties distinctes. En appliquant les formules générales au cas particulier d'une sphère de fer doux, aimantée par l'action du globe, on obtient un grand nombre de résultats qui ont été parfaitement confirmés par des expériences directes faites par M. Barlow.

Digitized by Google

Nous n'entrerons pas dans les détails de cette théorie; les calculs en sont trop élevés pour trouver place dans un traité élémentaire de physique; mais nous essayerons de faire concevoir le mode de distribution du magnétisme libre dans une aiguille, et pour plus de simplicité nous considérerons l'aiguille comme formée d'une seule file de molécules. Si ces éléments étaient sans actions les uns sur les autres pour faire varier leur état magnétique, et si on supposait nuls les intervalles qui les séparent, tous les pôles élémentaires se neutraliseraient; il ne resterait que les pôles contraires des éléments extrêmes : alors l'aiguille ne serait aimantée qu'à ses extrémités. Mais il faut nécessairement admettre des intervalles entre les éléments magnétiques, et une influence mutuelle sur leur état final. Il doit en être des éléments magnétiques comme de petites aiguilles aimantées sous leur influence mutuelle (*fig.* 470) : elles prennent des états magnétiques qui ne sont pas les mêmes que si elles étaient isolées. Cela posé, considérons un élément magnétique à une certaine distance des extrémités du barreau. Soit n le nombre des éléments qui se trouvent du côté où sera, je suppose, le pôle boréal : il est évident que tous les pôles australs de ces éléments sont plus voisins de l'élément que nous considérons que les pôles boréals correspondants. Ainsi les premiers auront un excès d'action sur les derniers, et cet excès tendra évidemment à favoriser la décomposition du fluide magnétique dans l'élément; il en sera évidemment de même des molécules magnétiques qui se trouvent de l'autre côté; mais on trouve par le calcul que la somme de ces actions est la plus grande possible au centre, et qu'elle diminue du centre aux extrémités, d'abord très-lentement, et ensuite avec une grande rapidité. Ainsi, l'intensité magnétique des éléments diminue du centre aux extrémités : et l'excès d'action de deux pôles élémentaires voisins augmente du centre aux extrémités, et par suite tout se passe comme si les deux fluides magnétiques étaient répartis chacun dans une des moitiés de l'aiguille, et en quantité croissante à partir du milieu.

§ V. *De l'aimantation.*

825. Nous avons déjà vu que les corps susceptibles de devenir magnétiques acquéraient cette propriété par le contact avec un aimant; mais ces corps peuvent encore devenir magnétiques dans un grand nombre d'autres circonstances, par les décharges électriques, par l'action de la terre, par des courants galvaniques. Nous ne parlerons ici que des procédés employés pour donner à des barreaux d'acier la plus forte puissance magnétique au moyen des aimants naturels ou artificiels, ainsi que de l'aimantation par l'action de la terre; quant à celle qui provient des décharges électriques et des courants galvaniques, il en sera question dans les chapitres suivants.

Les méthodes d'aimantation directes, jusqu'ici employées, sont au nombre de deux, qu'on désigne sous les noms de *simple touche* et de *double touche*.

826. Avant d'exposer ces différentes méthodes, nous devons dire ce qu'on doit entendre par aimantation à saturation. La quantité de fluide magnétique développée dans un barreau croît toujours avec la force des aimants qui agissent sur lui, mais la quantité de fluide libre qui y reste lorsqu'il est soustrait à l'influence des aimants, dépend de sa force coercitive, et cette quantité est susceptible d'une limite qu'on nomme saturation. Une aiguille sursaturée ne perd pas cependant instantanément son excès de fluide, elle reste quelquefois plusieurs mois avant de revenir au point de saturation.

Pour reconnaître si une aiguille est aimantée à saturation, il faut l'aimanter de nouveau dans le même sens, avec des aimants plus forts : si elle acquiert une puissance magnétique plus grande que celle qu'elle avait d'abord, elle n'était point

Digitized by Google

aimantée à saturation; mais si elle ne prend qu'un faible accroissement de magnétisme, et si elle le perd avec le temps, ce sera une preuve qu'elle avait d'abord été aimantée à saturation.

827. *Méthode de la simple touche.* Lorsqu'on met le pôle d'un aimant en contact avec l'extrémité d'un barreau d'acier (*fig.* 471), il se manifeste au point *A* un pôle contraire à celui de l'aimant, et si le barreau est très-petit et très-court, l'aimant étant très-puissant, l'extrémité *B* acquerra un pôle contraire à celui du point *A*. En effet, le barreau étant supposé très-court, et l'aimant très-puissant, la décomposition du fluide magnétique aura lieu dans tous les éléments du barreau d'acier; et, par l'action réciproque de tous les pôles élémentaires, il se développera des pôles opposés aux extrémités. Dans les circonstances dont nous venons de parler, le barreau sera fortement aimanté, et il le sera à saturation si, par l'action de l'aimant sur l'élément magnétique du barreau le plus éloigné, il peut se faire une décomposition plus grande que celle qui peut être maintenue par la force coercitive. Mais si la décomposition sur l'élément le plus éloigné est plus petite que celle qui peut subsister, l'aiguille ne sera pas aimantée à saturation, et il est facile de voir que la ligne neutre se rapprochera du point qui a été en contact avec l'aimant, et que les deux pôles n'auront pas des positions symétriques. Et, si le barreau a une certaine longueur, et surtout s'il possède une grande force coercitive, l'influence directe du pôle de l'aimant ne se manifestera que sur une certaine partie *AC* (*fig.* 472), qui se terminera au point où son action sera égale à la force coercitive; au delà le barreau ne présentera aucun indice de magnétisme.

Si on touchait avec un des pôles de l'aimant un point quelconque du barreau d'acier, on y développerait un pôle, et de chaque côté, à une distance plus ou moins considérable, des pôles de nature contraire : ainsi on pourra produire par un simple contact un point conséquent en un point quelconque d'un barreau. Dans les barreaux qui renferment des points conséquents, les fluides magnétiques sont disposés de la même manière que dans des barreaux ayant pour longueur les distances des points conséquents et qui seraient réunis par les pôles du même nom.

828. Une méthode, qui paraît préférable à la première, consiste à faire glisser le pôle d'un aimant sur un barreau d'acier; dans chacune de ses positions, il attire le magnétisme de nom contraire et repousse l'autre : par conséquent, dans son mouvement il fait successivement passer chaque point du barreau par deux états magnétiques différents, et lorsqu'il a quitté le barreau, la dernière extrémité touchée a un pôle de nom contraire à celui de l'aimant, et la première a un pôle de même nom.

Pour se rendre compte de l'effet produit par cette méthode, considérons d'abord le barreau lorsqu'il touche l'aimant par une de ses extrémités (*fig.* 473) : le barreau acquiert d'abord deux pôles *a* et *b* comme par la méthode du simple contact; mais à mesure que l'aimant glisse sur le barreau, il change la nature de l'aimantation qu'il avait donnée d'abord. En effet, considérons le barreau lorsqu'il est touché au point *p* par l'aimant (*fig.* 474) : au point *p* se trouve un point conséquent; la partie *pr* est chargée de fluide austral, je suppose, ainsi que la partie *ps;* et en *mr* ainsi qu'en *sn* se trouve le fluide boréal; mais à mesure que le point *p* avance vers *n*, l'état magnétique de la partie *pr* change, le point *r* avance, le point *s* recule, et quand le barreau est arrivé à l'extrémité *n*, le point *r* est au milieu du barreau, et les extrémités *m* et *n* possèdent des pôles contraires. On voit d'après cela que le développement de magnétisme dans chaque élément, occasionné par l'influence à distance de l'aimant et par le contact, change de signe, et varie continuellement d'intensité pendant le mouvement. Il résulte de là que des frictions réitérées n'augmenteraient pas l'aimantation si elles avaient lieu sur les mêmes files de molécules, parce que chacune détruirait

Digitized by Google

l'état magnétique produit par la précédente. Il résulte aussi de là que, si, après avoir aimanté un barreau avec un aimant puissant, on passe sur ce barreau un aimant plus faible, ce dernier, au lieu d'augmenter l'état magnétique du barreau, le diminue à chaque friction, et finirait par le réduire à ce qu'il aurait été si le barreau n'eût été aimanté que par lui, parce que ce dernier tend d'abord à détruire, par le contact avec chaque élément, l'état magnétique qui avait été produit par le premier. Il résulte aussi de ce qui précède que la méthode en question est peu supérieure à celle dont nous avons parlé d'abord, et qui consiste dans le simple contact d'une des extrémités du barreau avec un des pôles de l'aimant, du moins quand les barreaux sont très-courts.

Cette méthode d'aimantation est bonne cependant pour aimanter des aiguilles courtes et d'une petite dimension; mais elle a l'inconvénient de donner souvent des points conséquents. Il suffit même, pour en produire à volonté, de laisser plus longtemps sur un point le pôle de l'aimant; elle a d'ailleurs l'inconvénient de ne pas aimanter uniformément.

829. *Méthode de la double touche.* Cette méthode produit un développement de magnétisme bien supérieur à celui que l'on obtient par la simple touche: elle consiste à frotter sous une grande pression le long d'un barreau les deux pôles opposés de deux barreaux aimantés couchés (*fig.* 475), perpendiculaires (*fig.* 475 *A*), ou inclinés (*fig.* 476 et 477), en les faisant mouvoir parallèlement ou en sens contraire, et en armant les extrémités du barreau que l'on veut aimanter de masses de fer doux ou de forts aimants.

830. Knight, en 1745, eut le premier l'idée d'employer deux aimants. Son procédé consiste (*fig.* 475) à placer bout à bout les pôles opposés de deux forts barreaux aimantés, et au-dessus le barreau que l'on doit aimanter, de manière que son milieu corresponde à leur ligne de jonction, et à séparer les aimants en les faisant mouvoir chacun de son côté : on obtient ainsi un effet beaucoup plus grand qu'avec la simple touche. On en concevra facilement la raison en remarquant que par cette méthode, dans toutes les positions des deux aimants mobiles, la nature du magnétisme développé dans les éléments du barreau qui les séparent reste la même, et que leurs actions concourent avec celle du magnétisme déjà développé dans ces éléments pour produire l'état magnétique final. Par cette méthode on peut aimanter à saturation des barreaux courts et peu épais; mais il est impossible d'aimanter à saturation un barreau un peu long.

831. Duhamel introduisit dans cette méthode un perfectionnement important. Il plaçait le barreau à aimanter entre deux barres de fer doux (*fig.* 476); les frictions se faisaient par des barreaux aimantés, comme dans la méthode de Knight, mais ils étaient inclinés de 25 à 30 degrés. Cette méthode renferme deux circonstances importantes, qui sont 1° l'inclinaison des aimants, qui en rapprochant leurs centres d'action du barreau augmentait leur effet; 2° l'emploi des armures de fer doux. Pour concevoir l'effet produit par ces armures, il faut remarquer qu'aussitôt que les barreaux ont acquis un certain degré de magnétisme ils aimantent les barreaux de fer; le magnétisme développé dans ceux-ci dissimule et fixe une partie du magnétisme polaire des barreaux, et donne ainsi aux aimants plus de facilité pour opérer une nouvelle décomposition de fluide par une nouvelle friction.

La méthode de Knight ou de Duhamel est la meilleure pour aimanter de la manière la plus complète et la plus régulière les aiguilles de boussoles et les lames dont l'épaisseur ne dépasse pas 4 à 5 millimètres.

832. Mitchell employa une autre méthode. Elle consiste à mettre plusieurs barreaux d'acier en contact à la suite les uns des autres, et à frotter sur leur surface,

Digitized by Google

par les pôles contraires et perpendiculairement, deux faisceaux de barreaux aimantés, fixés à une distance constante (*fig.* 475 *A*). Les barreaux intermédiaires se trouvent fortement aimantés.

Il est facile de voir que, dans cette méthode, les barreaux, placés les uns à la suite des autres, se servent mutuellement d'armature, et agissent comme les barres de fer doux dans la méthode de Duhamel : c'est pour cette raison que les barreaux intermédiaires prennent seuls un grand développement de magnétisme. Quant à l'influence de la position des deux aimants fixés entre eux, on peut s'en rendre compte aisément : en effet, la décomposition du fluide magnétique dans les éléments du barreau qui sont placés entre les deux aimants est effectuée par le concours des actions des deux barreaux, et cet état magnétique tend à changer quand les aimants ont dépassé ces éléments ; mais alors le nouvel état magnétique ne tend à s'établir que par la différence des actions des deux barreaux ; par conséquent, l'état magnétique que les éléments ont reçu en passant entre les deux barreaux subsiste encore en grande partie après la course des aimants.

833. Æpinus fit à cette dernière méthode une amélioration importante. Il plaça de forts aimants à l'extrémité des barreaux d'acier, et il inclina les aimants mobiles sur la surface des barreaux d'acier, comme l'avait fait Duhamel ; mais il les fixa entre eux comme dans la méthode de Mitchell (*fig.* 477). Par cette inclinaison, la résultante des actions des aimants sur chaque molécule *m* devenait plus oblique sur la surface du barreau, et par conséquent la composante horizontale devenait plus considérable ; mais comme, à mesure que l'inclinaison augmente, les pôles des aimants s'éloignent, l'inclinaison, pour produire le maximum d'effet, devait atteindre une certaine limite que l'expérience seule devait faire connaître. Æpinus trouva que cette limite était de 15° à 20°.

La méthode d'Æpinus est celle qui donne le plus grand développement magnétique ; mais elle a l'inconvénient de produire souvent des points conséquents, et toujours une aimantation irrégulière. D'après Coulomb, la ligne neutre est toujours rapprochée de quelques millimètres de la partie qui a été aimantée la dernière ; celle de Duhamel est exempte de cet inconvénient. La méthode de Duhamel, en remplaçant les barreaux de fer doux par de forts aimants, est la meilleure que l'on puisse employer pour des aiguilles de boussoles. On place l'aiguille à aimanter de manière qu'elle empiète de 15 à 18 lignes sur les aimants, ou seulement de 7 à 8 lignes, si elle n'a que 3 ou 4 pouces de longueur ; quand l'aiguille est trop mince, on la place sur une pièce de bois où on peut la fixer. La méthode d'Æpinus doit être préférée pour aimanter de forts barreaux.

834. *Influence du choc.* Les aimants perdent toujours une partie de leur magnétisme quand ils sont frappés, mais surtout quand ils le sont dans une position verticale, et que le pôle austral est en haut.

835. *Influence de la température sur l'état magnétique des aimants.* Nous avons déjà dit que par la chaleur rouge les aimants perdaient complétement leur force magnétique ; mais cette perte a lieu progressivement, et un fait très-remarquable observé par Kupffer, c'est que l'influence de la température n'est pas instantanée, c'est-à-dire qu'il faut un certain temps pour que toute la recomposition du fluide qui peut s'effectuer à une certaine température s'accomplisse. Ainsi, par exemple, une aiguille qui a été plongée à plusieurs reprises dans de l'eau bouillante, chaque fois pendant 10 minutes, n'a conservé un état magnétique permanent qu'après la sixième immersion.

Lorsque la température d'un barreau aimanté varie seulement par les changements de la température de l'air, son état magnétique change : l'intensité magnétique du barreau diminue avec l'élévation de température, et augmente avec son abaissement.

Digitized by Google

Lorsque les variations sont très-grandes, par exemple de 13° à 80°, par le refroidissement l'aiguille ne reprend pas le même état magnétique : par exemple, une aiguille aimantée a fait 10 oscillations en 429″ à 13°, 10 oscillations en 476″ à 80°, et 10 oscillations en 463″ à 13° après le refroidissement (Kupffer). Lorsqu'on chauffe seulement une partie du barreau, le point d'indifférence s'éloigne de la partie chauffée; dans le cas d'une barre de fer doux aimantée par l'action de la terre, le point d'indifférence se rapproche de la partie chauffée, probablement parce que la force coercitive diminue, et que l'aimantation augmente.

836. *Magnétisme relatif du fer, de l'acier et de la fonte.* D'après M. Barlow, en représentant par 100 l'action magnétique à froid du fer doux, celle de l'acier non trempé est comprise entre 66 et 74; celle de la fonte de fer est 48. Au rouge blanc, l'action magnétique de la fonte est plus grande que celle du fer et de l'acier; à cette température, celle du fer est nulle; au rouge de sang, celle du fer est considérable; à une température comprise entre le rouge de sang et le rouge blanc, l'action magnétique du fer et de la fonte sur une aiguille aimantée est opposée à celle qui existe à froid. Il est probable que cette anomalie singulière provient de la formation de points conséquents par l'influence de la terre. Ces expériences ont été faites en plaçant dans la direction de l'aiguille d'inclinaison et successivement dans le même lieu des barres égales, et à une petite distance une aiguille aimantée; ces expériences auraient besoin d'être répétées.

837. *Influence de la trempe sur le pouvoir coercitif.* Si on prend un barreau d'acier dans un état parfait de recuit, c'est-à-dire qui a été chauffé au rouge blanc et refroidi à l'air, qu'on le trempe successivement à différentes températures, et qu'après chaque trempe on l'aimante à saturation, on trouve que le développement de magnétisme qu'il peut acquérir et conserver croît avec la température de la trempe, du moins quand la température a été assez élevée pour modifier l'état physique du barreau. Nous rapporterons une série d'expériences faites par Coulomb.

Température de la trempe.	Durée de 10 oscillations après l'aimantation à saturation.
Jusqu'à 700°	93
780	78
860	64
950	63

Jusqu'à 700° la trempe n'a eu aucune influence, parce que c'est à cette température que l'influence de la trempe sur l'élasticité de l'acier commence à se manifester; et l'on voit que la force coercitive a plus que doublé de 700° à 950°, puisque les intensités magnétiques étaient comme $(93)^2 : (63)^2 :: 8649 : 3969$.

838. *Influence du recuit sur la force coercitive.* Le recuit, diminuant l'effet de la trempe, doit produire un effet analogue à celui qui résulterait d'une trempe à une plus basse température : c'est ce qui existe en effet. Nous avons déjà dit que le recuit s'estime ordinairement par la teinte que prend l'acier par l'action de la chaleur; il passe d'abord à une nuance jaune clair, ensuite successivement à l'orangé, à l'orangé foncé, au rouge-violet, au bleu vif, et à une couleur verdâtre qu'on désigne sous le nom de vert d'eau. La première nuance paraît répondre à 200°, la dernière à 410°.

D'après les expériences de Coulomb, un barreau trempé cerise clair, étant recuit à différentes températures, a donné les résultats suivants :

Digitized by Google

Température du recuit.	Temps de 10 oscillations après une nouvelle aimantation.
12°	63″
214	64,5
410 couleur d'eau	70
900 cerise clair	93

On voit d'après cela que les barreaux recuits au bleu conservent assez de pouvoir coercitif pour prendre une grande intensité magnétique, et comme l'acier trempé très-dur est très-cassant, et qu'il acquiert alors facilement des points conséquents, il y a toujours de l'avantage à recuire au bleu les aiguilles de boussoles.

D'après Coulomb les aiguilles dont la longueur excède trente fois le diamètre présentent des résultats opposés : le recuit augmente la puissance magnétique, et d'autant plus qu'il a lieu à une plus haute température, du moins jusqu'à une certaine limite. Cette anomalie provient de ce qu'il se forme toujours dans les aiguilles longues des pôles intermédiaires qui se rapprochent à mesure que le recuit augmente, et qui finissent par se confondre.

839. *Formes et dimensions des aiguilles de boussoles.* Il résulte des expériences de Coulomb, comme nous l'avons déjà dit, que les aiguilles en losange à poids égal ont une plus grande force directrice que sous toute autre forme : ainsi la forme en losange doit être préférée. Quant à l'épaisseur, elle doit être la plus petite possible, attendu que, la force directrice variant dans un plus petit rapport que l'épaisseur, et la résistance de la pointe de suspension augmentant au moins dans le rapport des poids, l'amplitude de l'angle d'arrêt augmente avec l'épaisseur. Quant à l'influence de la longueur, elle est presque nulle, car le frottement dans la chappe et la force directrice varient sensiblement comme les longueurs des aiguilles, les sections restant les mêmes.

840. *Faisceaux magnétiques.* On appelle faisceaux magnétiques des barreaux aimantés réunis parallèlement et par les pôles de même nom. La *fig.* 479 représente un faisceau en fer à cheval; les lames, après avoir été trempées et aimantées, sont appliquées les unes sur les autres, et maintenues par des bandes. La *fig.* 478 représente un faisceau construit d'après la méthode de Coulomb : il est formé de trois couches, renfermant chacune cinq lames; elles sont assujetties dans des pièces de fer qui leur servent d'armatures. Lorsqu'on aimante séparément des barreaux et qu'on les réunit pour en former un faisceau, on n'obtient point un effet égal à la somme des effets que produiraient séparément les barreaux, parce que les pôles voisins exercent les uns sur les autres une action réciproque qui les affaiblit. Coulomb, pour étudier les phénomènes qui se développent dans les faisceaux, prit seize lames d'acier découpées dans la même feuille, ayant la forme d'un parallélogramme rectangulaire; elles avaient 6 pouces de longueur, 9 lignes 1/2 de largeur; après les avoir aimantées séparément à saturation, il en forma différents faisceaux, en les posant à plat les unes sur les autres, et les liant par des fils de soie; puis il les suspendit et observa les torsions nécessaires pour les retenir à 30° du méridien magnétique. Il obtint les résultats suivants :

Nombre des lames assemblées	Torsions observées
1.	82°
2.	125
4.	150
6.	172
8.	182
12.	205
16.	229

Digitized by Google

On voit, d'après ce tableau, que la torsion est loin de croître proportionnellement au nombre des lames.

Coulomb, ayant isolé les lames de chaque faisceau, essaya séparément la force directrice de chacune d'elles, en les amenant toujours à 30° du méridien. Il obtint les résultats suivants pour les 8 lames supérieures d'un faisceau de 16 lames :

Rang des lames.	Torsions.
1re	48°
2e	36
3e	35
4e	33
5e	34
6e	38
7e	35
8e	31

Ainsi, les lames centrales avaient éprouvé une diminution de magnétisme.

L'effet magnétique d'un faisceau de barreaux paraît être le même que celui d'une masse continue de même dimension.

Nobili, qui a répété ces expériences, a trouvé que les aiguilles centrales prenaient des pôles contraires. On voit d'après cela que, quand on forme des faisceaux, il est très-avantageux de les disposer en retraite, à partir du centre, de manière à former aux extrémités des cônes saillants ou rentrants, car alors les actions des barreaux tendent à augmenter leur puissance magnétique. Il résulte aussi de ces expériences que la partie centrale d'un barreau tend plutôt à diminuer l'effet qu'à l'augmenter; c'est d'ailleurs ce qu'une expérience directe de Nobili démontre avec la dernière évidence : deux cylindres d'acier de mêmes diamètres et de mêmes longueurs, mais dont l'un avait été foré, de manière que les poids étaient 28 grammes pour le premier et 16 grammes pour le second, ayant été trempés de la même manière et aimantés à saturation, produisirent sur une aiguille placée de la même manière par rapport à chacun d'eux, le premier une déviation de 9°,5, et le second une déviation de 19°.

D'après Coulomb, des barreaux semblables, formés d'aiguilles de fer écroui, ont des forces directrices proportionnelles aux cubes des côtés homologues. M. Quetelet a trouvé que pour des aimants semblables d'acier les forces directrices étaient proportionnelles aux carrés des côtés homologues. Coulomb a reconnu, par des expériences très-délicates, que pour les fils circulaires aimantés à saturation par la méthode de la double touche, les quantités de magnétisme libre développées aux extrémités sont proportionnelles aux rayons des fils.

841. *Des armatures.* Lorsque le pôle *A* d'un aimant (*fig.* 479) touche l'extrémité *a* d'un barreau et y développe un magnétisme contraire, ce magnétisme réagit sur l'aimant, et tend à y exciter une nouvelle décomposition de magnétisme. Cette augmentation produit dans le barreau *ab* une décomposition nouvelle qui réagit encore sur le pôle *A*, de sorte que l'un et l'autre, par cette mutuelle réaction, acquièrent un magnétisme plus intense.

C'est ce que l'on peut facilement vérifier en suspendant à un aimant en fer à cheval (*fig.* 479) un barreau de fer et une coupe de balance : on trouve que tous les jours le poids que l'aimant peut soutenir augmente; mais quand on détache le fer, si l'aimant avait d'abord été aimanté à saturation, il reprend son magnétisme primitif; dans le cas contraire, il conserve seulement une partie de ce qu'il a acquis.

Les barres de fer doux dont on garnit les aimants portent le nom d'*armatures*. Les barreaux aimantés sont ordinairement placés parallèlement dans une boîte

Digitized by Google

(*fig.* 480), de manière que les pôles contraires se correspondent, et aux deux extrémités on met transversalement des prismes quadrangulaires de fer doux, qui complètent le parallélogramme : chacune de ces pièces de fer devient un aimant qui réagit sur les barreaux pour y fixer les fluides décomposés.

Les armatures sont utiles en outre parce que dans certaines positions des aimants le magnétisme terrestre tend à recomposer les fluides magnétiques libres. Les aiguilles libres se trouvent toujours placées, en vertu de leur force directrice, de manière que l'action de la terre agit pour y développer une plus grande énergie : ainsi l'action de la terre leur tient lieu d'armatures.

On met aussi des armatures aux aimants naturels, non-seulement pour augmenter la force magnétique des pôles, mais encore pour donner au magnétisme de la masse une meilleure direction. Ces armatures sont des plaques de fer doux que l'on applique contre les faces des pôles préalablement polies, et que l'on maintient par des cercles de cuivre (*fig.* 481).

842. *Aimantation partielle des lames d'acier.* M. Haldat a observé qu'on pouvait aimanter partiellement des plaques d'acier, suivant des contours quelconques, et produire alors, en y projetant de la limaille de fer, des figures analogues à celles que l'on forme sur des gâteaux de résine en y promenant le bouton d'une bouteille de Leyde chargée. M. Haldat emploie des plaques de tôle d'acier, propres à la fabrication des cuirasses, de 2 à 3 décimètres carrés et de 1 à 3 millimètres d'épaisseur ; elles doivent être décapées et adoucies à la lime ou au grès fin. Pour les aimanter partiellement, on se sert d'un fort barreau aimanté, dont une des extrémités est arrondie ; on promène cette extrémité sur la plaque en suivant la ligne que l'on veut aimanter ; elle est rendue visible en répandant sur la lame de la limaille de fer. On peut ainsi écrire des mots, mais les lettres ne doivent pas avoir moins de 4 à 5 centimètres de hauteur pour être bien distinctes. Les traces de l'aimant restent vides et la limaille de fer se range autour de cet espace ; le magnétisme ainsi développé reste souvent encore sensible après six mois. Pour faire disparaître ces traces immédiatement, il suffit de chauffer la plaque sur des charbons jusqu'à la température à laquelle l'acier prend la teinte jaune paille. Pour éviter le polissage de la pièce après le recuit, M. Haldat emploie des plaques étamées et les chauffe jusqu'à la fusion de l'étain ; mais comme l'enduit métallique s'oxyde, on lui rend son éclat en le frottant avec une poignée d'étoupe imbibée d'huile mêlée de sel ammoniac, après avoir répandu sur la surface de la lame une petite quantité de limaille d'étain. On peut aussi faire disparaître entièrement les traces de magnétisme en excitant dans la lame de violentes vibrations : pour cela on la place sur un madrier et on la frappe à coups précipités avec un petit maillet de bois ; après trois ou quatre minutes tout indice de magnétisme a disparu. Les vibrations excitées dans la plaque de manière à la rendre seulement sonore sont insuffisantes pour produire l'effet dont il est question.

M. Haldat a encore observé un phénomène très-remarquable, relatif à l'influence du frottement sur le développement du magnétisme. Si on prend des fils de fer doux non recuits, d'un décimètre de longueur et d'un millimètre de diamètre, et si on les place entre les pôles contraires de deux aimants assez distants pour qu'ils ne décomposent pas le fluide magnétique des fils, ces derniers s'aimantent quand on les frotte vivement et longitudinalement avec un corps dur, tel que du laiton, du cuivre, du zinc, du verre et même du bois. Ainsi l'ébranlement des molécules d'un corps facilite son aimantation. On conçoit facilement d'après cela pourquoi il est nécessaire, quand on veut développer une grande puissance magnétique dans de gros barreaux, de faire les frictions avec une grande pression.

843. *Aimantation par l'action de la terre.* La terre, comme nous l'avons vu,

Digitized by Google

exerce une action continuelle sur les aimants et sur tous les corps magnétiques. Cette force tend à aimanter ces derniers; mais, à cause de son peu d'énergie, elle ne produit cet effet que sur les corps qui n'ont qu'une petite force coercitive. Cette aimantation est évidemment analogue à celle qui a lieu par l'influence d'un aimant à distance. L'action magnétique de la terre est surtout remarquable sur le fer doux. Si on prend une barre de fer de 2 ou 3 pieds de longueur, placée dans la direction du magnétisme terrestre, ou seulement verticalement, elle prend un pôle austral à la partie supérieure et un pôle boréal à la partie inférieure; si alors on fait tourner la barre autour de son milieu, l'intensité des pôles s'affaiblit à mesure que la barre se rapproche d'une position perpendiculaire à sa première direction : alors tout indice de polarité disparaît, et si on continue le mouvement les pôles reparaissent de nouveau, mais en sens contraire, de sorte que le pôle austral est toujours sur l'extrémité supérieure de la barre.

D'après M. Barlow, les boulets et les bombes sont aimantés par le magnétisme terrestre : les deux pôles sont aux extrémités du diamètre parallèle à la direction de l'aiguille d'inclinaison; sur tous les points des diamètres perpendiculaires l'action magnétique est nulle, et cette action croît de cet équateur aux pôles. Les sphères pleines et creuses de même diamètre extérieur agissent de la même manière, pourvu que l'épaisseur excède 1/30 de pouce. Enfin, pour une même position de la boussole les tangentes des déviations sont proportionnelles aux cubes des diamètres ou aux puissances 3/2 des surfaces, quelles que soient les épaisseurs des globes.

On concevra facilement, d'après cette expérience, que tous les corps magnétiques du globe deviennent, sous l'influence magnétique de la terre, de véritables aimants, dont les pôles changent avec leur position; mais si, par une circonstance quelconque, les corps ainsi magnétisés acquièrent une force coercitive, alors leur polarité subsiste, malgré les changements de position; et, pour que les corps acquièrent une force coercitive, il suffit qu'ils éprouvent une action mécanique quelconque, une percussion, une vibration, une torsion, qu'ils soient soumis à l'action de la lime, ou qu'ils s'oxydent. C'est ce que l'on peut facilement reconnaître par les expériences suivantes. Lorsqu'une barre de fer doux, placée verticalement, est aimantée par l'action de la terre, si on la frappe avec un marteau à l'une de ses extrémités, les pôles deviennent fixes et ne changent plus avec la position de la barre; mais si on retourne la barre et qu'on la frappe de nouveau, on parvient à l'aimanter en sens contraire. Cependant la force coercitive ainsi imprimée à la barre n'est pas permanente : car après quelques jours, et souvent même après quelques heures, la polarité magnétique fixe a disparu. On peut produire les mêmes phénomènes sur des fils de fer que l'on tord dans une position verticale. Dans les ateliers où l'on travaille le fer, presque tous les outils sont des aimants. Quant à l'influence de l'oxydation, on a remarqué depuis longtemps que toutes les barres de fer qui sont exposées à l'air dans une position verticale, et qui sont oxydées, sont de véritables aimants. C'est Jules César, chirurgien de Rimini, qui fit le premier cette observation, en 1590. En 1630 elle fut confirmée par Gassendi, qui reconnut que la croix du clocher de Saint-Jean d'Aix, qui était tombée de vétusté, et dont le pied était entièrement oxydé, possédait toutes les propriétés d'un aimant. On peut également aimanter des barres d'acier par l'influence de la terre, en les maintenant dans une position verticale et les frappant avec un marteau de haut en bas; on obtient beaucoup plus d'effet en les posant, par la partie inférieure, sur des barreaux plus grands, de fer ou d'acier; on peut même obtenir ainsi une aimantation assez puissante pour que les barreaux, frictionnés ensuite entre eux par la méthode de la double touche, finissent par être aimantés à saturation : c'est un résultat auquel M. Scoresby est parvenu. Il est très-probable que, dans les

Digitized by Google

expériences sur le fer doux rapportées précédemment, l'ébranlement des molécules facilitait le développement des pôles, comme dans l'acier : car le fer doux n'est jamais complétement dépourvu de force coercitive. C'est ce qu'il est facile de reconnaître en soumettant à l'action d'un aimant un morceau de fer récemment recuit, afin de faire disparaître tout écrouissage : le morceau de fer conserve toujours des traces de polarité.

§ VII. *Action des aimants sur tous les corps.*

844. En 1812, Coulomb fit connaître à l'Institut une série d'expériences relatives à l'influence des aimants sur les corps non magnétiques. L'appareil qu'il employait est représenté dans la figure 482. Une aiguille de 6 à 8 millimètres de longueur, formée d'or, d'argent, de verre, de bois, ou de différentes substances organiques ou inorganiques, était suspendue par un fil de cocon sous une cloche de verre ; les pôles contraires de deux forts aimants pouvaient être approchés à une petite distance des extrémités de l'aiguille. Coulomb compta le nombre d'oscillations que les aiguilles exécutaient dans un temps donné, hors de l'influence et sous l'influence des aimants, et toujours il reconnut un accroissement de vitesse dans cette dernière circonstance : des barres non aimantées ne produisaient point cet effet. Ces phénomènes ne pouvaient s'expliquer qu'en admettant que tous les corps sont magnétiques, ou que toutes les substances renferment du fer, du nickel ou du cobalt. Pour que cette dernière hypothèse fût admissible, il faudrait que des quantités de ces métaux assez petites pour échapper aux analyses fussent suffisantes pour produire les phénomènes dont il s'agit. Pour mesurer l'influence des petites quantités de fer renfermées dans les corps, Coulomb fit des mélanges artificiels et des alliages de fer en toutes proportions, et en comparant leurs effets, il fut conduit à cette conclusion que, si les phénomènes dont il est question sont réellement dus à la présence des métaux magnétiques, ces métaux sont, dans les corps soumis à l'expérience, en quantités si petites que leur présence ne peut pas être mise en évidence par les réactions chimiques. Coulomb a aussi reconnu que la plupart des matières végétales et animales éprouvaient plus d'action magnétique que les métaux purifiés par les méthodes ordinaires. D'après les expériences de M. Becquerel, dans les corps faiblement magnétiques, comme les peroxydes de fer, le bois, la gomme laque, et d'une forme prismatique, la distribution du magnétisme ne se fait pas toujours dans la direction de l'axe.

845. Ces expériences peuvent servir à déterminer les quantités de fer qui se trouvent dans différentes substances. M. Biot en a fait une application remarquable, que nous allons rapporter. En faisant osciller deux petits faisceaux de lames de mica de différentes espèces, en présence de deux puissants aimants, dans le même temps l'un fit 12 oscillations, et l'autre 7 : les forces magnétiques étaient alors entre elles comme les nombres 144 et 49, et l'analyse chimique démontra ensuite que dans ces deux variétés de mica le fer se trouvait dans le même rapport.

846. Lebaillif, au moyen d'un appareil d'une grande sensibilité, a reconnu depuis que presque toutes les substances agissent sur l'aiguille aimantée. Il a aussi constaté ce fait remarquable que le bismuth et l'antimoine exercent toujours une action répulsive sur l'aiguille aimantée.

L'appareil de Lebaillif, qu'il désigne sous le nom de *sidéroscope*, est représenté *fig.* 483 ; il se compose d'une paille de 12 à 15 pouces de longueur, dans laquelle on place trois fines aiguilles à coudre, aimantées à saturation ; l'aiguille *ab* est placée dans la paille, de manière que son axe soit dans le prolongement de celui de la paille, les deux autres *a'b'* et *a''b''* traversent la paille perpendiculairement ; elles sont dis-

Digitized by Google

posées de manière que leurs pôles contraires se correspondent. La paille est supportée horizontalement par un petit étrier de papier qui est fixé à l'extrémité d'un fil de cocon (*fig.* 484). La partie *mn* n'a point de force directrice : on pourrait par conséquent remplacer les deux aiguilles par un petit contre-poids ; mais la partie *m'n'* a une force directrice qui dépend de l'intensité magnétique de l'aiguille et du rapport des distances des deux pôles de l'aiguille *ab* à l'axe de rotation ; elle est évidemment d'autant plus faible que l'aiguille est plus petite relativement à la longueur de la paille. Au-dessous de l'aiguille *ab* se trouve un arc de cercle divisé, et tout l'appareil est environné par une cage de verre pour soustraire les mouvements de l'aiguille à l'influence de l'air. La cage est percée en avant d'une ouverture circulaire, destinée à l'introduction des corps à l'action desquels on veut soumettre l'aiguille.

Cependant, tous les faits relatifs aux actions exercées par les corps sur les aimants ne sont pas encore constatés par des expériences assez multipliées ; ces actions sont si faibles qu'il faut des précautions extrêmement nombreuses et très-délicates pour écarter les causes étrangères qui pourraient les produire ou les altérer.

§ VIII. *Effets magnétiques des corps en mouvement.*

847. En 1822, M. Arago découvrit ce fait important : quand une aiguille aimantée oscille très-près d'une plaque solide ou d'une masse liquide placée au-dessous d'elle, elle éprouve une sorte de résistance, indépendante de celle de l'air, qui anéantit bientôt les oscillations sans influer sensiblement sur leur durée, et d'autant plus rapidement pour le même corps que sa distance à l'aiguille est plus petite. Par exemple, si la plaque est en cuivre et si elle est suffisamment voisine de l'aiguille, la diminution successive des amplitudes peut être telle que l'aiguille ne fasse que 3 ou 4 oscillations d'une étendue sensible avant de revenir au repos, tandis que l'on en pourrait compter 3 ou 4 cents s'il n'y avait d'autre résistance que celle de l'air. M. Arago a reconnu, à des degrés différents, le même genre d'influence dans les autres métaux, dans le verre, l'eau, la glace, etc.

848. L'influence des différents corps sur l'amplitude des oscillations d'une aiguille aimantée a été étudiée par MM. Arago, Nobili et Bacelli, Seebeck et Baumgaertner. Nous rapporterons seulement ici les résultats obtenus par M. Seebeck. L'aiguille aimantée dont ce physicien s'est servi avait 2 pouces 1/8 de longueur ; elle était placée à 3 lignes de distance des plaques. Il a observé le nombre des oscillations qui devaient s'exécuter pour que l'amplitude fût réduite de 45° à 10°. Le tableau suivant présente les résultats de ces expériences.

Nombre des oscillations	Épaisseurs des plaques.	Substances.
116	2,0 *lignes*	Marbre
112	2,0	Mercure
106	2,0	Bismuth
94	0,4	Platine
90	2,0	Antimoine
89	0,75	Plomb
89	0,2	Or
71	0,5	Zinc
68	1,0	Étain
62	2,0	Laiton
62	0,3	Cuivre
55	0,3	Argent
6	0,4	Fer

Digitized by Google

M. Seebeck a remarqué qu'en alliant des substances magnétiques à d'autres qui ne le sont pas, on peut former des composés qui n'exercent aucune action sur l'aiguille aimantée : tels sont, par exemple, l'alliage d'une partie de fer et de quatre d'antimoine, et celui d'une partie de nickel avec deux parties de cuivre.

849. Depuis, M. Arago a fait des expériences en sens contraire ; il a soumis l'aiguille en repos à l'action de diverses plaques en mouvement. Il en est résulté des phénomènes fort remarquables, que nous décrirons après avoir fait connaître l'appareil employé par ce savant physicien.

Cet appareil est représenté en coupe (*fig.* 485) ; *ab* est un plateau circulaire de cuivre rouge ou de toute autre substance, fixé par son centre à la tige verticale *xy*, à laquelle on donne un mouvement rapide de rotation au moyen d'une horloge; *cd* est une ouverture circulaire faite dans le plateau *MN*, elle est fermée inférieurement par une feuille de papier collée sur les bords ; *ABCD* est une cloche de verre, dont la tubulure est garnie d'une douille terminée par un petit treuil, autour duquel s'enroule un fil de soie *mn*, qui supporte l'aiguille aimantée.

Dès que le mouvement du plateau *ab* commence, l'aiguille est déviée dans le sens de la rotation ; si la vitesse de la plaque n'est pas trop considérable, l'aiguille parvient, après un temps très-court, à une position stationnaire, dans laquelle l'action de la plaque fait équilibre à l'action magnétique de la terre, qui tend à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique. L'angle dont elle s'en écarte dans cette position dépend de la distance de l'aiguille au plateau, de la vitesse et de l'épaisseur de la plaque ; il augmente avec cette vitesse jusqu'à ce que la déviation soit de 90° : alors l'aiguille tourne sans s'arrêter dans le même sens que la plaque. Les mêmes phénomènes ont lieu, mais à un moindre degré, lorsqu'on remplace le cuivre par d'autres matières ; ils diminuent dans un grand rapport lorsque la continuité de la plaque tournante est interrompue par un assez petit nombre de fentes dirigées du centre à la circonférence, et disparaissent presque entièrement si la plaque est remplacée par de la poussière ou de minces copeaux de la même matière. En interposant entre l'aiguille et la plaque mobile des plaques de différents métaux et de verre, l'action n'est point altérée ; elle est au contraire fortement diminuée par l'interposition d'une plaque de fer, et presque détruite par deux ; cette dernière observation est due à MM. Herschell et Babbage. Lorsqu'on suspend le disque par un fil de cocon et qu'on fait tourner l'aimant au-dessous, le disque est entraîné : c'est évidemment ce qui doit arriver en vertu du principe de l'égalité de l'action et de la réaction.

850. Dans les expériences que nous venons de rapporter, la déviation ou la rotation sont produites par une force perpendiculaire aux rayons du disque et parallèle à son plan ; mais la rotation de la plaque développe encore deux autres forces, dont l'une est perpendiculaire au plan du disque, et l'autre dirigée suivant les rayons. M. Arago a démontré l'existence de ces deux forces par les expériences suivantes. Une aiguille aimantée fut suspendue verticalement par un fil à l'extrémité du fléau d'une balance, et équilibrée par des poids ; sous l'extrémité inférieure de l'aiguille on fit tourner un disque de cuivre, et on observa une diminution de poids : ainsi la rotation du disque développe une force répulsive, perpendiculaire à sa surface. Pour constater l'existence d'une force dirigée suivant les rayons du disque, M. Arago dispose une aiguille d'inclinaison de manière que son plan de rotation soit perpendiculaire au méridien magnétique, l'aiguille est alors dirigée verticalement ; et sous son extrémité inférieure il fait tourner un disque de cuivre. Lorsque le centre de rotation de l'aiguille est dans l'axe de rotation du disque, l'aiguille n'éprouve aucune déviation ; mais si on la fait marcher dans le sens d'un même rayon, de manière que son extrémité corresponde successivement aux différents points de ce rayon et de son

Digitized by Google

prolongement, on remarque que, quand la pointe de l'aiguille tombe en dehors du disque, elle est repoussée loin du centre de rotation. Cette répulsion diminue à mesure que l'aiguille se rapproche du centre, elle devient nulle à une certaine distance, et se change en une force attractive qui diminue et devient nulle quand l'aiguille est au centre; ainsi, sur chaque rayon du disque, il y a un point entre le centre et la circonférence où la force dont il s'agit est nulle; au delà elle est répulsive, et en deçà elle est attractive. Dans la fig. 486, les différentes positions de l'aiguille sont indiquées par des lignes pleines.

851. Comme nous l'avons déjà dit, toutes les substances ne produisent pas, par leur mouvement, les mêmes effets sur l'aiguille. Les métaux agissent beaucoup plus que les autres substances, et plusieurs physiciens n'ont pas obtenu d'effets sensibles avec le verre, le bois, l'eau, etc.

D'après MM. Herschell et Babbage, les effets relatifs des différents métaux sont représentés par les nombres suivants :

Cuivre	1,00	Zinc	0,93
Étain	0,46	Antimoine	0,09
Plomb	0,25	Bismuth	0,02

D'après MM. Prevost et Colladon, les angles de déviation augmentent proportionnellement à la vitesse de rotation, et les sinus des angles de déviation varient en raison inverse de la puissance $\frac{11}{5}$ de la distance; mais d'autres physiciens ont trouvé des lois différentes pour l'influence de la distance.

852. Nous avons déjà dit que, quand le plateau est garni de fentes dans le sens des rayons, il perd une partie de son action, d'autant plus grande que le nombre des fentes est plus considérable, et qu'elle n'est point rétablie en remplissant les fentes par des poussières métalliques. MM. Herschell et Babbage ont reconnu que des disques de fer étamé ne perdent presque rien de leur action par des fentes dirigées suivant les rayons, lorsque les fentes sont remplies par de l'étain.

Ces mêmes physiciens, en opérant avec des disques de cuivre et de laiton d'abord pleins, puis garnis de huit fentes suivant les rayons, également espacées, et successivement vides et remplies par différentes soudures, et en les suspendant au-dessus d'un aimant auquel on donnait une vitesse de rotation uniforme, ont obtenu pour la force accélératrice qui faisait tourner le disque les valeurs suivantes :

Disque de laiton.		Disque de cuivre.	
Plein	1,00	Plein	1,00
Coupé suivant 8 rayons	0,24	Coupé suivant 8 rayons	0,20
Fentes soudées avec du bismuth	0,53	Fentes soudées à l'étain	0,91
— — avec de l'étain	0,88		

853. D'après M. Haldat, un disque de fer doux agit avec plus d'énergie qu'un disque de cuivre; avec la même vitesse il produit une déviation deux fois plus grande. Le fer fortement écroui se comporte comme le fer doux; mais un disque d'acier non trempé ne produit point d'effet : l'aiguille après quelques oscillations reprend sa position primitive. Les disques incandescents produisent le même effet qu'à la température ordinaire.

854. Six mois après la publication de la découverte de M. Arago, M. Barlow communiqua à la société royale de Londres des recherches fort intéressantes, relatives à

Digitized by Google

l'action des globes de fer tournant sur une aiguille aimantée. Nous rapporterons quelques-uns des résultats obtenus par ce physicien. Une bombe de 8 pouces de diamètre tournait avec une vitesse de 720 tours par seconde autour d'un axe horizontal passant par son centre; une aiguille rendue sensiblement astatique (V. plus loin, n° 862) par un aimant convenablement placé était successivement présentée à la même distance de la bombe, dans un plan horizontal passant par l'axe de rotation, et dans une direction tangentielle à la bombe. Dans toutes les directions de l'axe de rotation et dans tous les azimuths, l'extrémité nord de l'aiguille était attirée si le mouvement de la bombe était dirigé vers l'aiguille; elle était repoussée dans le cas contraire. Le maximum d'effet avait lieu à l'équateur, le minimum aux pôles de rotation. Si on élevait l'aiguille au-dessus du plan dans lequel nous l'avons supposée, elle était sollicitée dans le même sens jusqu'à une certaine hauteur; au delà l'action changeait de signe ; cette hauteur angulaire dépendait de la direction de l'axe de rotation. M. Barlow a constaté que dans ces phénomènes les boulets pleins agissent avec une plus grande énergie que les boulets creux de mêmes rayons.

Ces phénomènes se rattachent à d'autres, découverts par M. Faraday, et dont il sera question plus tard sous le nom d'*Induction*.

§ VI. *Magnétisme terrestre.*

855. L'action de la terre sur les aiguilles aimantées se manifeste non-seulement à sa surface, mais encore à de très-grandes hauteurs dans l'atmosphère, comme MM. Gay-Lussac et Arago l'ont reconnu, et à toutes les profondeurs auxquelles on est parvenu. La terre paraît agir comme un aimant dont les pôles magnétiques seraient situés sur une ligne sensiblement différente de son axe de rotation.

856. *Direction de la force magnétique de la terre.* Imaginons une aiguille aimantée, librement suspendue par son centre de gravité : sa pesanteur étant détruite par la résistance du point de suspension, elle pourrait prendre autour de ce point toutes les positions possibles. Il est évident que l'aiguille se dirigerait parallèlement à la résultante totale des actions attractives et répulsives exercées par la terre sur ses éléments magnétiques : la direction de cette résultante serait par conséquent donnée par celle de l'aiguille. L'hypothèse que nous venons de faire ne pouvant pas être réalisée, la direction du magnétisme terrestre ne peut pas être observée directement; mais cette direction étant déterminée par l'angle que fait avec le méridien du lieu le plan vertical de l'aiguille, et par l'angle que forme l'aiguille avec l'horizon, angles que nous avons désignés sous les noms de *déclinaison* et d'*inclinaison*, et qui peuvent être observés, le premier par une aiguille suspendue par son centre de manière à se mouvoir dans un plan horizontal, et le second par une aiguille mobile autour d'un axe horizontal qui passe par son centre de gravité et qu'on place perpendiculairement au méridien magnétique, il en résulte que la direction de l'action magnétique du globe est ramenée à la mesure de la déclinaison et de l'inclinaison.

857. *Appareils employés pour mesurer la déclinaison.* Les appareils dont on se sert pour observer la déclinaison portent le nom de *boussoles*. Les boussoles sont formées d'une aiguille aimantée ayant ordinairement la forme d'un losange, garnie à son milieu d'une chappe en matière dure, montée sur un pivot et lestée sur la partie sud de manière qu'elle se tienne en équilibre horizontalement; l'aiguille est renfermée dans une boîte munie d'une division circulaire. En plaçant dans le méridien géographique le diamètre qui passe par le zéro de la division, l'extrémité de l'aiguille indique la déclinaison. Les aiguilles doivent avoir la forme indiquée, parce que, d'après les expériences de Coulomb, c'est celle qui, à poids égal, produit la plus grande

Digitized by Google

force directrice ; elles doivent être très-minces, parce que, d'après le même physicien, le frottement de la chappe sur la pointe est proportionnel au poids de l'aiguille, et que l'intensité du magnétisme que peut acquérir une aiguille croît dans un plus petit rapport que son épaisseur.

Si une aiguille horizontale n'avait qu'une largeur infiniment petite, sa direction serait toujours celle des résultantes horizontales des actions magnétiques terrestres ; mais dans le cas contraire, qui a toujours lieu, il peut arriver que l'axe de figure ne coïncide pas avec la direction de ces résultantes. Pour en concevoir la raison, soit *AB* (*fig.* 489) une aiguille aimantée ; tous les points magnétiques de chaque moitié seront attirés et repoussés par les deux pôles de la terre : par conséquent, sur chaque moitié il y aura un point *G* par lequel passera la résultante de toutes ces actions. La ligne *GG* prendra donc la direction des forces parallèles appliquées aux points *G*, *G*, et si cette ligne ne coïncide pas avec l'axe de figure, il est évident que les extrémités de l'aiguille n'indiqueront pas la déclinaison. Pour reconnaître si dans une aiguille l'axe magnétique coïncide avec l'axe de figure, il faut la retourner de manière que la face supérieure devienne la face inférieure : il est évident que l'axe magnétique ne changera pas de position et que l'axe de figure prendra la position *A'B'* (*fig.* 490), et que dans cette nouvelle position l'aiguille sera déviée d'une quantité égale, mais opposée ; de sorte qu'en prenant le milieu de l'arc compris entre les extrémités de l'aiguille dans ces deux positions, on aura exactement la déclinaison.

Pour effectuer cette opération, on donne à l'aiguille la forme représentée *fig.* 487 ; elle est percée à son centre d'un trou *o*, au moyen duquel on la place sur une chappe garnie d'un rebord *mn* (*fig.* 488) ; par cette disposition on peut facilement exécuter le retournement.

Pour déterminer la déclinaison à l'aide de cet instrument, il faudrait, si l'appareil ne devait pas changer de place, que la méridienne du lieu fût tracée sur le cadran ; dans le cas où il devrait être transporté, et c'est le cas le plus ordinaire, il faudrait que l'on pût à chaque instant, et dans un lieu quelconque, déterminer la méridienne terrestre. Quelquefois les boussoles sont aussi employées pour déterminer l'angle qu'une direction déterminée fait avec le méridien magnétique. Pour satisfaire à ces différentes conditions, la boussole devient plus compliquée dans sa construction.

858. La boussole dont on se sert pour lever les plans est représentée *fig.* 478 ; elle est formée d'une boîte carrée en bois, renfermant un cadran divisé et une aiguille librement suspendue ; le zéro de la division correspond à un diamètre parallèle au côté *cd*, contre lequel est appliqué un tuyau à section rectangulaire mobile autour d'un axe *oo'* qui le fixe à la caisse de la boussole ; ce tuyau est fermé d'un côté par une plaque mince, percée d'une fente verticale très-fine, et l'extrémité opposée est garnie d'un fil parallèle à la fente, disposé de manière que le plan de la fente et du fil soit parallèle à la ligne *gh* du cadran. Pour déterminer l'angle que la ligne qui joint deux points fait avec le méridien magnétique, on se place à l'un de ces points ; on fixe la boussole horizontalement et on la fait tourner dans son plan jusqu'à ce que, en regardant par la fente du tuyau, l'autre point soit placé derrière le fil : l'aiguille indique alors sur le cadran l'angle cherché.

859. Pour mesurer la déclinaison, on emploie l'appareil représenté en perspective et en coupe (*fig.* 491 et 492) : les mêmes lettres indiquent les mêmes objets dans les deux figures ; *ab* aiguille ; *cd* cercle divisé que parcourt l'extrémité de l'aiguille ; *ef* boîte de la boussole ; *gh* verre plat qui ferme la caisse où se trouve l'aiguille : elle est destinée à soustraire l'aiguille à l'effet produit par l'agitation de l'air ; *ik* axe solide fixé au fond de la boîte de la boussole ; *lm* cercle fixé au pied de la boussole par six rayons, *np*, *n'p'* : ce cercle porte le nom de cercle azimuthal ; *qr*, *q'r'* deux nonius

Digitized by Google

diamétralement opposés, fixés à la caisse de la boussole, et qui parcourent le cercle azimuthal; *st* lunette mobile autour de l'axe *a'a''* parallèle au cercle azimuthal, elle porte à son foyer deux fils qui se croisent dans l'axe oblique; *u* nonius fixé à la lunette et qui parcourt le quart de cercle divisé *xy*, qui sert à indiquer l'angle du rayon visuel avec l'horizon; *z,z* vis destinées à rendre l'appareil horizontal.

Voici de quelle manière on se sert de cet instrument. On dirige la lunette sur un astre connu; on note l'instant de l'observation ainsi que la hauteur de l'astre sur l'horizon et l'angle formé par le plan que décrit la lunette avec l'aiguille; on calcule, au moyen des tables astronomiques, l'angle que le plan vertical de l'astre faisait avec le méridien astronomique à l'instant de l'observation, et alors on en déduit facilement l'angle du méridien magnétique avec le méridien astronomique. Si l'axe magnétique de l'aiguille ne coïncidait pas avec son axe de figure, il faudrait faire une seconde observation après avoir retourné l'aiguille, et prendre une moyenne entre les deux déclinaisons obtenues.

860. Pour les observations en mer, les boussoles sont disposées d'une autre manière. Les *fig.* 493 et 494 en présentent une coupe et une perspective : *abcd* boîte de la boussole; *ef* vitre qui ferme la boîte; *gh* aiguille recouverte d'un disque de mica, sur lequel est collé un disque de papier, divisé en degrés et portant les signes des vents, et qu'on désigne sous le nom de *rose des vents* (*fig.* 495) : par cette disposition, la rose des vents se meut avec l'aiguille; *i* et *k* sont deux pinnules diamétralement opposées : la première porte une fente étroite, la seconde un fil très-délié; derrière la première se trouve un petit miroir incliné à 45°, la partie supérieure de la portion du miroir qui correspond à la fente de la pinnule est transparente, de manière qu'on puisse apercevoir le fil de l'autre pinnule.

La boîte de la boussole est suspendue par deux tourillons *l,m* à un cercle *lmno;* ce dernier repose par deux autres tourillons *p,q*, placés perpendiculairement aux premiers sur un cercle *pqrs*, fixé au châssis *tuvx*, consolidé sur un montant par le point *P*, et qui peut tourner autour d'un axe vertical. Par cette disposition la boîte de la boussole reste toujours horizontale.

Pour observer la déclinaison au moyen de cet instrument, on dirige à l'aide des deux pinnules un rayon visuel vers un astre ou un objet placé à l'horizon, et on lit sur le miroir la division de la rose correspondante à cette direction; pour avoir la déclinaison du lieu, il faut ensuite déterminer l'angle du méridien géographique avec le plan vertical de l'objet.

La boussole a été en usage chez les Chinois longtemps avant d'être connue en Europe. L'usage nautique de la boussole remonte à l'an 1150; mais elle ne fut généralement employée qu'en 1300. Les missionnaires jésuites assurent que l'on trouve chez les Chinois des indications que la connaissance de la boussole y remonte à une très-haute antiquité.

861. *Déviation de la boussole des navires par le fer qui entre dans leur construction ou dans leur charge.* Les grandes masses de fer qui entrent dans la construction des navires, dont les unes sont fixes et les autres mobiles, doivent exercer sur la boussole une action considérable. On a trouvé en effet qu'elle s'élevait quelquefois à 15° ou 20°. C'est Wales, astronome de l'expédition de Cook, qui, le premier, a signalé cette source d'erreurs dans les observations de la boussole en mer; mais c'est le professeur Barlow qui, le premier, a indiqué le moyen de corriger ces erreurs. Nous allons décrire la méthode qu'il a employée.

Dans un navire, la boussole peut être déviée 1° par la décomposition du fluide magnétique qu'elle détermine dans les substances magnétiques qui l'environnent; 2° par l'état magnétique permanent que peuvent avoir ces substances en vertu de leur

Digitized by Google

force coercitive ; 3° par l'état magnétique variable qu'elles prennent sous l'influence du magnétisme terrestre.

La première cause ne peut produire que de faibles actions, et l'on peut s'en garantir en plaçant l'habitacle à une grande distance des masses de fer du navire.

Quant à la seconde cause, si elle existait seule, on pourrait facilement en mesurer l'influence. En effet, chaque corps magnétique agirait toujours de la même manière sur l'aiguille ; et comme chacun d'eux est très-éloigné de l'aiguille relativement à sa longueur, son action se réduirait à un couple, et tous les couples résultant de l'action des différents corps magnétiques se réduiraient en un couple unique, qui se combinerait avec le couple résultant de l'action de la terre pour produire la direction de l'aiguille. Mais quand le navire tournerait sur sa quille, le couple terrestre conserverait la même position dans l'espace, tandis que l'autre, devant toujours conserver la même position relativement à l'axe du navire, tournerait avec lui : alors la direction de l'aiguille changerait continuellement ; mais il est facile de voir que, dans le mouvement de rotation du navire, l'aiguille éprouverait par le couple étranger des déviations qui pousseraient l'aiguille tantôt à l'est et tantôt à l'ouest, et que les déviations dans deux directions opposées seraient égales et de signes contraires : par conséquent, en prenant la moyenne de ces déclinaisons, on obtiendrait la déclinaison vraie.

La troisième cause est beaucoup plus puissante que les deux autres, et ses effets sont sans cesse variables, parce que, tous les corps magnétiques du navire changeant de position par rapport à l'axe magnétique de la terre avec la position du navire, ils deviennent par conséquent des aimants dans lesquels l'intensité magnétique et la position des pôles changent continuellement quand la navire tourne sur lui-même, et dans lesquels ces variations sont encore modifiées, lorsque le navire est en marche, par les changements de direction et d'intensité du couple terrestre. Pour neutraliser l'influence de la deuxième et de la dernière cause de dérangement de l'aiguille, M. Barlow a proposé le moyen suivant.

Le bâtiment étant dans une rade tranquille, où l'on peut facilement le faire tourner sur sa quille, un observateur s'établit près de l'habitacle avec un instrument propre à mesurer les angles ; un autre observateur s'établit sur le rivage, en un point que l'on puisse facilement apercevoir du navire, avec une boussole et un instrument destiné à mesurer les angles. A un signal donné, chacun des observateurs dirige sa lunette vers l'autre station, et détermine l'angle formé par l'aiguille de sa boussole avec la projection horizontale de l'axe de sa lunette. Les projections horizontales des deux axes des lunettes étant sur le prolongement l'une de l'autre, il est évident que, si l'aiguille du navire n'éprouvait point de déviation, sa direction devrait être parallèle à celle qui est à terre, et par conséquent, elles devraient faire le même angle avec l'axe de la lunette : la différence de ces deux angles est donc la déviation produite par les corps magnétiques du navire. Si alors on fait tourner le navire sur sa quille, et qu'à chaque angle de 10 ou 12 degrés on fasse des observations semblables, on aura pour chacune de ces positions la valeur de la déviation produite par les circonstances locales. Lorsque ces opérations sont terminées, l'observateur du rivage substitue à sa boussole celle du navire ; il la fixe à une caisse en bois (*fig.* 496), que l'on peut faire tourner autour d'un axe vertical, dirigé suivant le prolongement du pivot de l'aiguille. Cette cage est percée latéralement de trous circulaires, destinés à recevoir le *compensateur*. Ce compensateur se compose d'une tige en cuivre rouge de 1 pouce 1/2 de diamètre, et de deux plaques de fer *M* et *M'* de 12 à 13 pouces de diamètre (mesures anglaises), et d'une épaisseur telle que le pied carré pèse 13 livres. Ces deux plaques sont séparées par une feuille de carton, elles sont serrées par des écrous placés à leurs circonférences, et fixées sur la tige de cuivre par des écrous

Digitized by Google

qui marchent sur cette tige. Alors on fait tourner l'appareil, et on règle la position du compensateur de manière qu'il produise sur l'aiguille, dans les différentes directions, les mêmes variations qu'elle éprouvait sur le navire par les masses magnétiques qui s'y trouvent, et on détermine la position du centre des plaques par rapport à l'aiguille; on porte ensuite l'appareil dans l'habitacle, et on règle la direction de la caisse de manière qu'elle soit placée, par rapport à l'aiguille, de la même manière : par ce moyen la déviation de l'aiguille se trouve doublée, et c'est ce qui donne le moyen de la mesurer. Pour cela, on observe la déclinaison en enlevant le plateau *MM'*, et ensuite en le plaçant : la différence est la correction qu'il faut faire à la première opération; par exemple, si la déclinaison sans le compensateur était de 30° et qu'elle fût de 36° avec le plateau, la déclinaison corrigée serait de 24°.

Cet ingénieux procédé ne peut être considéré que comme une approximation, 1° parce que les changements de température agissent sur la force coercitive des substances magnétiques du navire et sur la position du compensateur; 2° parce que la force magnétique de la terre n'agit pas de la même manière dans tous les lieux, à cause des variations d'inclinaison et d'intensité.

862. *Aiguilles astatiques.* On désigne ainsi des aiguilles aimantées disposées de manière à n'être point influencées par l'action de la terre. On peut remplir cette condition de plusieurs manières différentes, que nous allons successivement faire connaître.

1° On peut soustraire une aiguille à l'action de la terre, en plaçant dans le méridien magnétique de l'aiguille un aimant puissant dirigeant vers elle son pôle répulsif, et le plaçant à une distance convenable. L'action de la terre ne peut cependant jamais être ainsi complétement dissimulée, parce que, cette action se réduisant à un couple, il ne peut être détruit que par un couple opposé; ce qui exigerait que l'aimant fût à une très-grande distance de l'aiguille.

2° On peut disposer deux aiguilles de même forme, de même longueur, et aimantées de la même manière, soit sur un même axe vertical, de manière que les pôles de noms contraires soient en regard (*fig.* 497), soit dans la même direction (*fig.* 498), mais de manière que les pôles de même nom soient en regard. Il est évident que, l'action de la terre se manifestant en sens contraire sur les deux aiguilles, il n'en résulte aucune force directrice, pourvu toutefois que les aiguilles soient bien identiques pour la forme, le degré d'aimantation, et la distribution du magnétisme.

3° On pourrait aussi placer une aiguille perpendiculairement à un levier horizontal mobile autour d'un axe vertical (*fig.* 499), ou deux aiguilles égales fixées symétriquement aux deux extrémités d'un levier horizontal (*fig.* 500).

4° On peut enfin disposer une aiguille de manière qu'elle n'éprouve aucune influence de la part du magnétisme terrestre, en la rendant mobile autour d'un axe parallèle à l'axe magnétique de la terre : car il est évident que l'action de la terre tendra à faire mouvoir l'aiguille dans une direction que sa suspension rendra impossible. La fig. 501 représente une aiguille astatique disposée de cette manière. L'aiguille *ab* est traversée à son centre de gravité par l'axe *cd*, mobile dans deux tourillons, fixée au cadre *efgh* fixé lui-même au cercle *XY*; le limbe que parcourt l'aiguille est fixé au cercle *MN*, que l'on fait mouvoir dans son plan à l'aide de la vis sans fin *P*, et le cercle *MN* peut tourner autour d'un axe vertical au moyen du cercle *R* et de la vis sans fin *S*; la vis *T* sert à maintenir l'appareil à différentes hauteurs. Il est facile de voir qu'à l'aide de ces deux mouvements rectangulaires on peut toujours donner au limbe une direction quelconque.

863. *Variations de la déclinaison.* Dans les différents lieux, la déclinaison est tantôt orientale, tantôt occidentale. La déclinaison est orientale quand le pôle austral

Digitized by Google

de l'aiguille, c'est-à-dire celui qui se tourne vers le nord, se dirige vers l'est; elle est occidentale quand ce même pôle se dirige vers l'ouest. Les lignes qui passent par les points où la déclinaison est nulle portent le nom de *lignes sans déclinaison*. On en connaît quatre; elles sont très-irrégulières. La première est située dans le grand Océan, entre l'ancien et le nouveau monde; la seconde commence au-dessous de la Nouvelle-Hollande et se prolonge jusqu'en Laponie; la troisième communique avec la seconde près du grand Archipel d'Asie, et s'élève jusque dans la partie orientale de la Sibérie; enfin la quatrième paraît se trouver dans l'océan Pacifique, près des îles des Amis et de la Société. Leur position n'est pas constante. La première a éprouvé d'une manière irrégulière un grand déplacement depuis un siècle et demi.

864. Dans un même lieu, la déclinaison reste quelquefois constante pendant un certain temps; mais en général elle est variable, comme on peut le voir par le tableau suivant :

Tableau de la déclinaison de l'aiguille aimantée à Paris.

Année	1580	11°	30′ est	Année	1816	22°	25′ ouest
	1618	8	»		1817	22	19
	1663	0	»		1818	22	22
	1678	1	30 ouest		1819	22	25
	1700	8	10		1820	»	»
	1767	19	16		1821	»	»
	1780	19	55		1822	22	11
	1785	22	»		1823	22	23
	1805	21	5		1824	22	23
	1813	22	28		1825	22	22
	1814	22	34		1826	»	»

Les variations de la déclinaison ont été observées pour la première fois en 1622, par Gunter, professeur au collége de Gresham.

865. Indépendamment des variations que l'aiguille de déclinaison éprouve par les changements de lieu, et dans le même lieu à de grands intervalles, elle éprouve encore dans chaque lieu des variations diurnes. Dans l'hémisphère nord, la pointe nord de l'aiguille marche de l'est à l'ouest de 8 heures 1/4 du matin à 1 heure 1/4 après midi, et de l'ouest à l'est de 1 heure 1/4 après midi jusqu'au lendemain matin; dans l'hémisphère sud, la pointe sud de l'aiguille éprouve le même mouvement. Il existe probablement une ligne où l'aiguille reste stationnaire, puisque les mouvements sont contraires dans les deux hémisphères; mais on ignore si elle coïncide avec l'équateur ou si elle en diffère. C'est entre les équinoxes du printemps et d'automne qu'ont lieu les plus grandes variations diurnes, et c'est dans l'autre partie de l'année que se manifestent les plus petites. L'étendue de ces variations change avec les lieux : les plus grandes sont, à Paris, de 13′ à 16′, et les plus petites de 8′ à 10′. Il résulte en outre de la comparaison des observations de la déclinaison aux mêmes heures du jour que la pointe nord de l'aiguille marche vers l'est depuis l'équinoxe du printemps jusqu'au solstice d'été suivant, et vers l'ouest le reste de l'année.

Ces mêmes variations se manifestent dans les caves de l'Observatoire, qui sont à plus de 80 pieds au-dessous de la surface du sol.

Dans les régions du nord, il paraît que les variations diurnes sont plus considérables et moins régulières; l'aiguille ne reste point stationnaire pendant la nuit, et c'est vers le soir seulement qu'elle atteint son maximum de déviation occidentale. Lorsqu'on s'approche de l'équateur magnétique (870), l'amplitude des variations

Digitized by Google

diurnes va en décroissant, et à l'équateur magnétique elles sont sensiblement nulles.

Les variations diurnes de l'aiguille ne peuvent s'observer qu'à l'aide d'instruments susceptibles d'une grande précision, que l'on désigne sous le nom de *boussoles de variations*. Ces instruments se composent ordinairement d'un barreau aimanté, suspendu à un faisceau de fils de soie sans torsion, qui peut se mouvoir dans une boîte fermée par une glace; les deux extrémités du barreau parcourent des arcs de cercles divisés en très-petites fractions de degrés, sur lesquels on lit la position de l'extrémité du barreau à l'aide d'une loupe fixe.

866. La boussole de déclinaison est quelquefois dérangée de sa position, ou troublée dans ses variations diurnes par plusieurs causes accidentelles. Une des plus influentes est l'apparition des aurores boréales (1). Quand ce météore apparaît, pendant toute sa durée, qui est quelquefois de dix à douze heures, l'aiguille aimantée éprouve une agitation continuelle et une déviation souvent considérable; ces perturbations se manifestent non-seulement dans le lieu où l'aurore boréale est visible, mais à de grandes distances, et dans des lieux où l'on n'aperçoit aucune trace de lumière dans l'atmosphère. Par exemple, des aurores qui ne sont visibles qu'à Pétersbourg, en Sibérie ou en Amérique, agissent à Paris sur l'aiguille aimantée. Cependant l'agitation de la boussole est d'autant plus grande qu'elle est plus rapprochée du lieu où le phénomène se développe.

Les tremblements de terre et les éruptions volcaniques paraissent aussi agir sur l'aiguille aimantée. On prétend que les orages ont également de l'influence sur la boussole. Ce qu'il y a de positif, c'est que, quand la foudre tombe sur des corps aimantés ou dans leur voisinage, elle altère leur état magnétique, et même quelquefois renverse leurs pôles : car on a vu des boussoles de navire éprouver subitement une déviation d'une demi-circonférence par l'effet de la foudre.

867. *Appareils destinés à mesurer l'inclinaison.* La découverte de l'inclinaison a été faite en 1576; elle est due à Robert Normann, ingénieur en instruments de mathématiques, de Londres. L'appareil dont on se sert ordinairement pour mesurer l'inclinaison, et qu'on désigne sous le nom de *boussole d'inclinaison*, est composé (*fig.* 502, 503 et 504) d'un plateau circulaire divisé *AB*, que l'on établit horizontalement au moyen de trois vis *a*, *b*, *c*, et de deux niveaux à bulles d'air; il supporte un cercle vertical fixé sur des montants *C*, *D*, qui peuvent se mouvoir autour du centre du cercle horizontal. Les pièces horizontales *EF* portent, à la hauteur du centre du cercle vertical, une aiguille qui repose sur de petits coussinets en agathe par un axe très-délié passant par son centre de gravité. Lorsqu'on place le plan du cercle mobile de manière qu'il soit perpendiculaire au méridien magnétique, la force directrice de la terre rend l'aiguille verticale, parce que, dans cette position, les composantes horizontales de cette force sont détruites. Lorsqu'on fait tourner lentement le cercle vertical, l'aiguille s'incline de plus en plus, et atteint son maximum d'inclinaison quand le cercle est dans le méridien magnétique. Pour observer l'inclinaison, on commence par amener le cercle dans l'azimuth où l'aiguille est verticale, et au moyen du cercle horizontal divisé, on le place à 90° de distance angulaire : il est alors dans le méridien magnétique, et on compte l'inclinaison sur le limbe. Il peut se présenter ici la même cause d'erreur que dans les boussoles de déclinaison : l'axe magnétique peut ne pas coïncider avec l'axe de figure; alors par le retournement on corrige l'erreur. Mais il en est encore une autre dont l'influence peut être beaucoup plus

(1) L'aurore boréale paraît accidentellement dans le nord, tantôt comme une lueur vague répandue près de l'horizon, et semblable à l'aurore; d'autres fois, sous la forme de fusées phosphoriques, qui parcourent et illuminent en un moment toute l'atmosphère.

Digitized by Google

grande, c'est le défaut de coïncidence du centre de gravité avec l'axe de rotation; pour reconnaître ce défaut, s'il existe, et en mesurer l'influence, il faut changer les pôles de l'aiguille. Il est évident que la déviation de l'aiguille provenant de la cause dont il vient d'être question, se trouvera en sens contraire, et, par conséquent la demi-somme des inclinaisons observées avant et après le changement des pôles sera l'inclinaison vraie.

On peut déterminer par une construction géométrique très-simple l'inclinaison que prendra l'aiguille dans les différentes positions que l'on pourra donner au limbe de l'instrument autour de la verticale.

En effet, soit CD (*fig.* 505) la verticale du lieu, CDZ le méridien magnétique, de sorte que DZ soit la direction de l'aiguille de déclinaison, et B le point de rencontre de l'axe OB de l'aiguille avec la ligne horizontale DZ. Décrivons sur BD, comme diamètre, une circonférence; si on dirige le limbe de l'instrument dans un plan vertical CDX, OE sera la direction de l'axe de l'aiguille. En effet, BE est perpendiculaire sur CDX : par conséquent OE est la projection de OB sur le plan CDX.

Si on désigne par θ l'angle XDZ, par a l'inclinaison BOD dans le plan du méridien magnétique, et par x l'inclinaison dans le plan vertical CDX qui fait un angle θ avec le méridien, on aura

$$DE = DB \cos \theta, \text{ et } \operatorname{tang} x = \operatorname{tang} a \cos \theta. \qquad (a)$$

On voit facilement sur la figure, et en discutant cette formule, que le maximum d'inclinaison a lieu dans le méridien, et que l'aiguille se dirige verticalement quand le plan du limbe de l'instrument est perpendiculaire au plan du méridien magnétique.

Cette construction fait voir que l'on peut déterminer l'inclinaison dans le méridien magnétique, lorsqu'on connaît l'inclinaison dans deux plans perpendiculaires entre eux, sans qu'il soit besoin de connaître la déclinaison : car, si les plans DX et DX' sont rectangulaires, $DB = EF$ et $EF^2 = DE^2 + DF^2$;

ce qui donne $\operatorname{tang}^2 a = \operatorname{tang}^2 x + \operatorname{tang}^2 x'$.

Cette formule peut également se déduire de la formule (a).

868. La boussole d'inclinaison peut servir à déterminer la déclinaison, car l'aiguille sera verticale quand le plan du limbe sera perpendiculaire au méridien magnétique. Ainsi, en cherchant par tâtonnement la position du limbe où l'aiguille reste verticale, le méridien magnétique est perpendiculaire à ce plan. On pourrait aussi chercher la position du limbe dans laquelle l'inclinaison est à son maximum, ce plan serait aussi celui du méridien magnétique.

869. On peut déterminer l'inclinaison par un autre procédé qu'il est bon de connaître. L'action directrice de la terre peut être considérée comme formée de deux composantes, l'une verticale et l'autre horizontale. Si on pouvait parvenir à trouver le rapport de ces deux forces, on en déduirait facilement la position de la résultante. Pour cela, concevons qu'on ait une aiguille soutenue par un axe horizontal passant par son centre de gravité, et qu'elle puisse se mouvoir librement dans le méridien : cette aiguille s'inclinera en vertu de la composante verticale de l'action directrice de la terre, et si on rend l'aiguille horizontale en appliquant un certain poids sur la partie qui s'élève, ce poids, multiplié par sa distance au point de suspension, fera équilibre à la composante verticale, et par conséquent lui sera égal; quant à la détermination de la composante horizontale, on y parvient facilement en observant la durée des oscillations horizontales de l'aiguille.

Digitized by Google

En effet, on trouve par le calcul que la somme des moments des forces qui tendent à ramener l'aiguille dans le méridien magnétique est égale à

$$\frac{\pi p l^2}{g T^2}, \qquad (b)$$

π étant le rapport de la circonférence au diamètre, p le poids de l'aiguille, l la moitié de sa longueur, g l'intensité de la pesanteur, et T la durée d'une oscillation, la force étant appliquée à l'unité de distance. En désignant cette force par H, la composante verticale par V, et par i l'inclinaison, on aura

$$\text{tang } i = \frac{V}{H}.$$

Dans une expérience faite par Coulomb, l'aiguille avait la forme d'un parallélipipède rectangle; sa longueur était de 426^{mm}, 6, sa largeur de 13^{mm}, son épaisseur de 2^{mm}. Cette aiguille fut d'abord aimantée : suspendue horizontalement à des fils de soie, elle fit 50 oscillations en 495 secondes; elle fut ensuite suspendue de manière à devenir mobile autour d'un axe passant à peu près par son centre de gravité, et on reconnut que pour la rendre horizontale il fallait un poids de 200 milligrammes placés à une distance de 170^{mm}, 75 du point de suspension, ce qui donnait 34150 pour le moment statique. L'aiguille fut alors aimantée en sens contraire, et on obtint pour le moment statique 40546. En prenant la moyenne on trouve 37348 pour sa valeur exacte. On avait pour les autres données.

$$l = 213{,}3, \quad T = \frac{495}{50} = 9'',9, \; p = 88808, \quad g = 9808^{mm},8.$$

En substituant ces nombres dans la formule on trouve

$$i = 69^\circ\, 41'\, 18''.$$

870. *De l'inclinaison dans les différents points du globe.* On désigne sous le nom d'*équateur magnétique* la courbe qui passe par tous les points où l'inclinaison est nulle. On avait cru d'abord que cette courbe était un grand cercle incliné de 12° sur le plan de l'équateur, et qui coupait ce dernier en deux points, dont l'un était situé dans la mer du sud à 115°34′ de longitude occidentale, et l'autre à 295°34′ de longitude également occidentale. Mais M. Biot, en discutant les observations de Cook et de Williams Bayly, démontra que l'équateur magnétique se relevait au delà du nœud occidental, et qu'il venait de nouveau couper l'équateur. MM. Morelet et Hanstéen, qui se sont récemment occupés de la détermination de l'équateur magnétique, en discutant toutes les observations qui avaient été faites avant eux, ont trouvé des résultats peu différents. Ces deux physiciens placent l'équateur magnétique en totalité au-dessous de l'équateur terrestre, entre l'Afrique et l'Amérique; le plus grand écart est de 13° à 14°, et il correspond à 25° de longitude occidentale. Un des nœuds se trouve en Afrique par 22° ou 18° de longitude orientale. En partant de ce nœud du côté de la mer des Indes, la ligne sans inclinaison s'éloigne vers le nord de l'équateur terrestre, sort de l'Afrique un peu au sud du cap Guardafui et atteint sa plus grande élévation boréale (12°) dans la mer d'Arabie par 62° de longitude orientale; au delà, l'équateur magnétique, toujours situé dans l'hémisphère boréal, coupe la presqu'île de l'Inde un peu au nord du cap Comorin, traverse le golfe du Bengale en se rapprochant un peu de l'équateur terrestre, dont il n'est éloigné que de 8° à l'entrée du golfe de Siam; remonte ensuite tant soit peu au nord, est presque tangent à la pointe de Bornéo, traverse l'île de Paragua, le détroit qui sépare la plus méridionale des Philippines de l'île Mindanao, et sous le méridien de Waigiou se trouve de nouveau

Digitized by Google

placé à 9° de latitude nord. De là, après avoir passé dans l'archipel des Carolines, l'équateur magnétique descend rapidement vers l'équateur terrestre, et le coupe, d'après Morelet, par 174°, et, suivant Hanstéen, par 187° de longitude orientale. Il y a beaucoup moins d'incertitude sur la position d'un troisième nœud situé dans l'océan Pacifique par 120° environ de longitude occidentale; mais M. Morelet admet que l'équateur magnétique, après avoir seulement touché l'équateur terrestre, s'infléchit aussitôt vers le sud. M. Hanstéen suppose que cette courbe passe dans l'hémisphère boréal sur une étendue d'environ 15° de longitude et revient ensuite couper la ligne équinoxiale à 23° de la côte occidentale de l'Amérique. Cette divergence des deux courbes dans cette partie de leur course est beaucoup moins grande qu'elle ne paraît, car elles ne sont nulle part à 2° de distance l'une de l'autre dans le sens des cercles de latitude.

En comparant ces observations aux observations plus récentes faites par M. Freycinet, le capitaine Sabine et le capitaine Duperrey, il paraît très-probable que l'équateur magnétique est mobile et qu'il est doué d'un mouvement de translation d'orient en occident; c'est probablement à ce mouvement que sont dues les variations que l'inclinaison éprouve dans un même lieu avec le temps.

D'après M. Duperrey, qui, dans son voyage autour du monde, a coupé six fois l'équateur magnétique, cette courbe ne rencontrerait la ligne équinoxiale que dans deux points, qui seraient presque diamétralement opposés, et situés, l'un dans l'océan Atlantique, l'autre dans le grand Océan, à peu près dans le plan du méridien de Paris, et que là, où cet équateur ne rencontrerait que quelques îles éparses, il ne s'éloignerait que bien peu de la ligne équinoxiale; qu'il s'en écarterait davantage lorsque les îles se multiplient, et ne parviendrait à son maximum d'excursion, soit au nord, soit au sud, que dans les deux grands continents qu'il traverse; qu'enfin il existerait entre les sections australes et boréales de cette courbe singulière une symétrie remarquable et beaucoup plus parfaite qu'on ne l'avait supposé.

De chaque côté de l'équateur, l'inclinaison augmente à mesure qu'on s'en éloigne; mais dans l'hémisphère austral c'est le pôle boréal qui plonge au-dessous de l'horizon, et c'est le contraire dans l'autre hémisphère. Il semblerait d'après cela qu'il devrait exister à la surface du globe deux régions où l'inclinaison serait de 90°; mais dans les parties de la terre où elles sembleraient devoir être placées, l'expérience n'a jamais donné au delà de 84°.

Dans la détermination des points de l'équateur magnétique, on fait usage non-seulement des points de cette courbe qui ont été observés directement, mais des inclinaisons observées dans le voisinage, en se servant de cette loi, déduite de l'observation, que la tangente de la latitude magnétique est égale à la moitié de la tangente de l'inclinaison, pourvu que cette dernière ne dépasse pas 30°.

Le tableau suivant renferme les inclinaisons observées à Paris de 1670 à 1826.

Tableau de l'inclinaison de l'aiguille aimantée à Paris.

Année 1670	75°	00′	Année 1817	68°	38′
1754	72	13	1818	68	35
1756	72	25	1819	68	25
1780	71	48	1820	68	20
1791	70	52	1821	68	14
1798	69	51	1822	68	11
1806	69	12	1823	68	8
1810	68	50	1824	68	7
1814	68	36	1825	68	»
1816	68	40	1826	68	»

Digitized by Google

D'après Hanstéen l'inclinaison est soumise, comme la déclinaison, à des variations diurnes et annuelles.

875. *Mesure de l'intensité du magnétisme terrestre.* La direction de la force magnétique de la terre ne changeant pas sensiblement dans des lieux voisins, il en résulte que l'on peut regarder comme parallèles les actions exercées par la terre sur chaque point magnétique d'un aimant; par conséquent une aiguille d'inclinaison est, par rapport à l'action magnétique du globe, comme un pendule relativement à la pesanteur: ainsi, en faisant osciller une aiguille d'inclinaison, la durée des oscillations dépendra de son intensité magnétique, de sa longueur et de l'intensité du magnétisme terrestre. En faisant osciller une même aiguille dans différents temps et dans différents lieux, en supposant que son intensité magnétique fût invariable, on en déduirait, pour le temps et le lieu de l'observation, l'intensité du magnétisme terrestre : ces intensités seraient proportionnelles aux carrés des nombres d'oscillations faites dans le même temps. On emploie cependant rarement à cet usage les aiguilles d'inclinaison, leur mode de suspension produit trop de frottement et occasionnerait de trop grandes erreurs; on fait ordinairement osciller des barreaux aimantés, suspendus horizontalement à des fils de soie tels qu'ils sortent du cocon : on les rend horizontaux en les attachant aux fils de soie au moyen d'un étrier; pour éviter l'influence de l'air, on les renferme dans des cages de bois, dont une des faces est garnie d'un verre. Les oscillations d'une aiguille horizontale ne déterminent que l'intensité de la composante horizontale de la force magnétique terrestre; mais en combinant cette composante avec l'inclinaison, on en déduit facilement l'intensité de la force totale.

En désignant par F l'intensité magnétique de la terre, par f celle de l'aiguille, par i l'inclinaison, et par n le nombre d'oscillations de l'aiguille horizontale dans un temps donné; par F', f', i' et n' les mêmes éléments pour un autre lieu, les composantes horizontales de la force directrice seront $Ff \cos i$ et $F'f' \cos i'$, et on aura

$$\frac{Ff \cos i}{F'f' \cos i'} = \frac{n^2}{n'^2}, \quad \text{d'où} \quad \frac{F}{F'} = \frac{n^2 \cos i'}{n'^2 \cos i}.$$

Si on voulait avoir égard à la torsion du fil de suspension, il faudrait remplacer l'aiguille aimantée par une aiguille de laiton, de même forme et de même poids, et observer le nombre N d'oscillations qu'elle fait dans le même temps que l'aiguille aimantée en fait n; alors en désignant par g la force de torsion appliquée aux pôles de l'aiguille, et par k un coefficient constant, on aurait $g + F = n^2k$, et $g = N^2k$, d'où $F = k(n^2 - N^2)$. Ainsi, dans la formule précédente, il faudrait remplacer n^2 et n'^2 par $n^2 - N^2$, et par $n'^2 - N^2$.

Il y a cependant dans la méthode des oscillations horizontales une cause d'erreur qui peut avoir une grande influence. Un des pôles de l'aiguille ayant une tendance à s'abaisser au-dessous de l'horizon, il en résulte que le prolongement du fil de suspension ne passe jamais par le centre de gravité : de là une différence entre les longueurs des deux bras du levier de l'aiguille horizontale qui varie avec l'inclinaison. Cette différence peut occasionner de grandes erreurs dans la comparaison des oscillations d'une même aiguille faites dans des lieux où il existe une grande différence dans l'inclinaison.

876. La détermination des rapports des intensités du magnétisme terrestre dans différents lieux et en différents temps présente beaucoup d'incertitude, parce que les changements de température et d'autres circonstances peuvent faire varier l'état magnétique de l'aiguille. Jusqu'ici on n'avait trouvé aucun moyen de faire disparaître cet inconvénient; mais M. Poisson et M. Arago ont découvert deux méthodes au moyen desquelles les intensités magnétiques peuvent être déterminées avec une grande

Digitized by Google

exactitude. La méthode de M. Poisson consiste à faire osciller deux aiguilles d'inclinaison, d'abord séparément, et ensuite sous leur influence mutuelle, en plaçant leur centre de rotation dans une ligne parallèle à l'axe magnétique du globe : les vitesses d'oscillation de ces trois systèmes, les distances des centres de gravité, et les moments d'inertie par rapport aux axes de rotation, sont liés entre eux de telle manière qu'on en déduit la puissance magnétique de la terre, indépendamment de la force magnétique des aiguilles. Le procédé de M. Arago consiste à mesurer l'intensité magnétique d'une aiguille indépendamment de la force directrice de la terre. Il est fondé sur l'observation faite par ce célèbre physicien, que nous avons déjà rapportée, et qui consiste en ce que, si l'on fait tourner un plateau métallique sur lui-même dans le voisinage d'une aiguille aimantée, l'aiguille est entraînée dans le sens de ce mouvement avec une force d'autant plus considérable que sa puissance magnétique est plus grande. En faisant l'expérience dans un plan perpendiculaire à l'axe magnétique, l'influence de la force directrice de la terre sera nulle : alors les petits contrepoids dont chacune des extrémités de l'aiguille devrait être chargée pour que le plateau, tournant avec une certaine vitesse, la déviât de 10°, 20° ou 30°, etc., donneraient la mesure de l'intensité magnétique de ses pôles. Si l'on admettait la possibilité d'obtenir, à différentes époques, du fer doux ayant exactement les mêmes propriétés, on pourrait mesurer l'intensité des pôles d'une aiguille en la plaçant dans un plan perpendiculaire à l'axe magnétique, et mesurant la déviation que lui fait éprouver une même masse de fer placée à une distance déterminée.

877. D'après toutes les observations faites jusqu'ici, l'intensité magnétique augmente à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur magnétique; aux pôles elle paraît être une fois et demie plus grande qu'à l'équateur, de sorte que la ligne sans inclinaison est en même temps la ligne de moindre intensité. On a aussi reconnu que les lignes de même intensité ou *isodynamiques* diffèrent beaucoup par leur forme et leur position des lignes de même inclinaison : d'où il suit que sur l'équateur magnétique les intensités ne sont pas partout les mêmes, ce qui est d'accord avec l'observation. D'après M. Duperrey, les lignes isodynamiques et les lignes isothermes ont la plus grande analogie dans leur courbure et leur direction; il a aussi reconnu que les points de l'équateur magnétique sont précisément les points les plus chauds de chaque méridien.

D'après Hanstéen, l'intensité magnétique dans un même lieu est soumise à des variations périodiques, diurnes et annuelles. Le minimum diurne a lieu à 11 heures du matin, le maximum à 4 heures du soir en été, et à 6 heures en hiver; le minimum annuel en hiver, et le maximum en été.

878. D'après les expériences faites par MM. Biot et Gay-Lussac dans leurs voyages aérostatiques, celles de M. Humbolt dans les pays de montagnes, et celles beaucoup plus anciennes de Saussure, il semblait que l'action magnétique terrestre était la même à la surface de la terre et aux plus grandes hauteurs accessibles à l'homme; mais ces expériences n'ayant pas été corrigées de l'influence de la température, et les expériences de M. Kupffer ne permettant pas de douter qu'un abaissement de température n'augmente le nombre des oscillations d'une aiguille, la constance de ce nombre trouvé par les physiciens que nous avons nommés prouve que l'intensité du magnétisme terrestre diminue à mesure qu'on s'éloigne de sa surface; c'est ce que démontrent d'ailleurs les expériences faites dans le Caucase par M. Kupffer. On n'a pas pu constater par l'expérience si l'inclinaison est la même au-dessus, au-dessous et à la surface du sol; les observations dans les ballons sont impossibles, et la différence de composition du sol peut occasionner de grandes erreurs dans ces déterminations au-dessous du sol.

Digitized by Google

879. Il résulte de tout ce que nous venons de dire que la déclinaison, l'inclinaison, et peut-être aussi l'intensité magnétique, éprouvent dans chaque lieu des variations séculaires, et d'autres qui sont périodiques, diurnes ou annuelles, dont on ne connaît point encore les lois; mais comme des observatoires fixes ont été établis sur un grand nombre de points répartis sur toute la surface du globe, les observations se multiplient, et permettront dans un petit nombre d'années de déterminer les lois de ces phénomènes.

On avait admis que l'action magnétique de la terre était due à deux pôles magnétiques; en déterminant leur position de manière à satisfaire aux observations, M. Biot avait trouvé qu'ils devaient être très-voisins l'un de l'autre et du centre de la terre; mais pour rendre compte des inégalités de l'équateur magnétique il faudrait supposer d'autres centres magnétiques, et cette hypothèse n'expliquerait point les importantes observations de M. Duperrey et les variations périodiques. Dans l'état actuel de la science, il est beaucoup plus probable que l'action magnétique du globe provient des courants thermo-électriques qui se produisent périodiquement par les mouvements diurnes et annuels du soleil, ou du moins est modifiée par eux; mais cette question ne pourra être étudiée que quand on connaîtra parfaitement les lois du magnétisme terrestre.

CHAPITRE III.

DE L'ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

§ I. *Phénomènes généraux.*

880. Lorsqu'on frotte un morceau de verre, de soufre, de résine, ou un bâton de cire d'Espagne, avec une étoffe de laine, on remarque que ces corps jouissent, après le frottement, de la propriété d'attirer les corps légers, tels que des barbes de plumes, de petits fragments de papier, etc. La cause de ce phénomène a été désignée sous le nom d'*électricité*, du nom grec de l'ambre (ἤλεκτρον), substance dans laquelle on l'a reconnue pour la première fois.

Thalès (600 ans avant J.-C.) paraît être le premier philosophe qui ait fait connaître la propriété que possède l'ambre jaune d'attirer les corps légers. Avant le 16e siècle on ne connaissait point d'autres phénomènes électriques; mais, depuis, cette partie de la physique, étudiée par un grand nombre de physiciens, s'est enrichie d'une foule de découvertes. Maintenant l'électricité forme une des branches les plus étendues et les plus curieuses de la physique.

881. Les attractions dont nous venons de parler peuvent se manifester à des distances considérables, et ne sont point détruites par l'interposition des corps, de quelque nature qu'ils soient; c'est ce que l'on peut constater en plaçant des lames de différentes substances entre les corps électrisés et les corps légers. Ces attractions deviennent bien plus énergiques, et se manifestent à une bien plus grande distance, quand on emploie des corps d'une grande surface qu'on frotte très-vivement; on se

Digitized by Google

sert alors de différents appareils qu'on désigne sous le nom de machines électriques, et que nous décrirons plus tard. Au moyen de ces machines on obtient non-seulement des attractions énergiques, mais les surfaces électrisées deviennent lumineuses dans l'obscurité, elles acquièrent une odeur de phosphore, et lorsqu'on en approche d'autres corps, avant le contact il se manifeste une brillante étincelle.

882. *Inégalité de faculté conductrice des corps.* En général, lorsqu'un corps a été électrisé par le frottement, si on touche avec la main, un métal quelconque, de l'eau, etc., il perd la faculté d'attirer les corps légers, et rentre dans l'état où il était avant le frottement; mais si on le touche avec du verre, du soufre, des résines, de la soie, il conserve sa faculté électrique. Pour expliquer ces faits, on a admis que les phénomènes électriques étaient dus à un fluide très-subtil, qui pouvait facilement s'échapper à travers certains corps, et qui ne se propageait que difficilement à travers les autres. Les premiers ont été désignés sous le nom de *bons conducteurs*, les autres sous celui de *mauvais conducteurs*.

Pour reconnaître les différences de faculté conductrice des corps, on peut employer l'appareil suivant. *AB* (*fig.* 506) est un support en verre, à l'extrémité duquel est suspendue une petite balle de moelle de sureau *m*, au moyen d'un fil de soie très-fin; *n* (*fig.* 507) est une boule métallique fixée à l'extrémité d'un cylindre de la substance dont on veut connaître la faculté conductrice. On électrise la boule *n* en la mettant en contact avec un cylindre de verre récemment frotté, et en tenant l'appareil par le point *b*; alors on approche la boule de l'extrémité du petit pendule : il est évident que, s'il est dévié de sa direction, c'est que le corps *ab* n'a pas laissé passer l'électricité, et par conséquent qu'il est mauvais conducteur, et, dans le cas contraire, c'est qu'il conduit l'électricité. A la place du pendule on pourrait employer l'appareil *fig.* 508, qui est composé d'une aiguille en verre très-mince, mobile autour de son centre, et dont les extrémités sont garnies de balles de sureau. Pour observer la conductibilité des substances liquides ou gazeuses, il faudrait se servir d'un tube de verre *AB* (*fig.* 509), terminé par une boule métallique; on remplirait le tube du liquide, ou du gaz, ou de la vapeur que l'on veut essayer, et on mettrait l'extrémité de la colonne fluide en communication avec la main par un fil métallique.

On a ainsi reconnu que toutes les substances vitreuses, résineuses, les pierres, les briques, la terre sèche, la soie, les gaz secs, et en général toutes les substances qui deviennent immédiatement électriques par le frottement, étaient de très-mauvais conducteurs; et qu'au contraire l'eau, surtout celle qui est chargée de sels, presque tous les liquides, les gaz humides, le charbon calciné, les végétaux, les animaux, la terre humide et les métaux, sont de bons conducteurs.

On dit qu'un corps est *isolé* lorsqu'il est soutenu par un corps mauvais conducteur. Les corps que l'on emploie le plus fréquemment comme isoloirs sont des cordons de soie, des tubes de verre recouverts de gomme laque, et surtout des cylindres de cette dernière substance.

883. *Distribution de l'électricité entre deux corps en contact.* Lorsque deux corps conducteurs sont isolés, qu'après avoir électrisé l'un d'eux on les met en communication, et qu'on les sépare ensuite, on reconnaît que l'action du premier corps sur les corps légers qu'on lui présente est d'autant plus diminuée que le second a de plus grandes dimensions. On admet alors que, quand deux corps isolés, dont un seul est électrisé, sont en contact, l'électricité se partage entre eux, de manière que celui qui n'a pas été électrisé en prend d'autant plus que sa surface est plus grande, de sorte que, si elle était très-grande relativement à celle de l'autre, ce dernier ne conserverait pas d'électricité sensible : c'est ce qui arrive lorsqu'un corps électrisé est mis en contact avec le sol, directement ou par l'intermédiaire de corps bons conduc

Digitized by Google

teurs. C'est pour cette raison que la terre est souvent désignée sous le nom de *réservoir commun*.

Lorsque deux corps mauvais conducteurs sont mis en contact, l'un étant électrisé, l'autre étant à l'état naturel, ils ne perdent ou n'acquièrent de l'électricité qu'au point de contact même.

Lorsque deux corps sont, l'un bon conducteur et isolé, et l'autre mauvais conducteur, et que l'un d'eux, après avoir été électrisé, est mis en contact avec l'autre, le corps mauvais conducteur n'acquiert ou ne perd de l'électricité qu'au point de sa surface où le contact a lieu, tandis que l'accroissement ou la perte de l'électricité de l'autre se manifeste sur toute l'étendue de sa surface. Lorsqu'un corps conducteur, isolé et électrisé, est mis en contact avec un autre corps, aussi conducteur et isolé, à l'état naturel, de même forme et de même grandeur, l'électricité se partage également entre eux. On peut constater ce fait en présentant successivement les deux corps à la même distance d'un petit pendule : il éprouve par chacun d'eux la même déviation. L'expérience a été faite avec des boules de sureau et des boules égales des différents métaux, pleines ou creuses, avec des disques de fer et de papier : ainsi les corps bons conducteurs n'agissent point sur l'électricité par une affinité chimique ; il semble que ces corps sont des vases dans lesquels l'électricité se distribue suivant ses propres lois. Nous devons dire cependant que, si la quantité d'électricité partagée était très-faible, on trouverait une différence très-sensible entre les parties qui se répandraient dans les deux corps en contact ; ce fait a été démontré par des expériences récentes de M. Peltier. Il résulte de là que, comme nous le verrons plus tard, la conductibilité n'a rien d'absolu ; elle dépend pour chaque corps de la tension de l'électricité : alors, lorsque cette force est très-grande, relativement à la résistance du corps au mouvement de l'électricité, tous les corps doivent sensiblement se comporter de la même manière ; mais, dans le cas contraire, il ne peut plus en être de même.

884. *Tous les corps sont électriques par le frottement.* Les corps que nous avons indiqués comme étant électriques par le frottement, sans être isolés, sont tous mauvais conducteurs, et c'est par cette raison que l'électricité développée par le frottement y demeure. Mais on conçoit que, si un corps conducteur était aussi électrique par le frottement, on ne pourrait pas reconnaître cette propriété en tenant ce corps à la main : car, s'il s'électrisait, l'électricité s'écoulerait à mesure dans le réservoir commun par la main et le corps, qui sont aussi de bons conducteurs ; il faudrait nécessairement le tenir avec des gants de soie, ou à l'extrémité d'une tige de verre ou de résine. En opérant ainsi on a reconnu que tous les corps s'électrisaient par le frottement. On peut constater le développement de l'électricité par le frottement des corps solides, au moyen de deux plaques différentes, soutenues par des manches de verre ; cependant, lorsque les corps frottés sont tous deux métalliques, il faut employer des appareils d'une plus grande sensibilité pour reconnaître la présence de l'électricité dans chacun d'eux. On peut constater le développement de l'électricité par le frottement des liquides contre les corps solides, en agitant du mercure dans un vase de verre ; le vase se trouve électrisé : par exemple, en faisant monter rapidement le mercure dans la chambre d'un baromètre, le tube devient lumineux dans l'obscurité. On peut reconnaître l'influence du frottement des corps gazeux contre les corps solides en dirigeant le vent d'un soufflet contre une vitre : cette dernière devient électrique. Quant à l'effet du frottement des liquides et des gaz entre eux, on n'a fait aucune expérience ; mais il est très-probable qu'ils doivent aussi s'électriser : ainsi nous admettrons que tous les corps isolés par des corps non conducteurs s'électrisent par le frottement.

885. *Les électricités qui se développent dans deux corps isolés frottés l'un*

Digitized by Google

contre l'autre sont de nature différente dans chacun d'eux. Les corps chargés d'électricité de même nature se repoussent, et ceux qui sont chargés d'électricité de nature différente s'attirent. Lorsque deux corps isolés ont été frottés l'un contre l'autre, si on les approche chacun séparément du petit pendule *AB* (*fig.* 506), ou de l'aiguille horizontale (*fig.* 508), tous deux attirent les balles de sureau. Mais si on touche la boule du pendule avec un des corps, de manière qu'elle partage son électricité, elle sera repoussée par ce corps et attirée par l'autre. On peut faire cette expérience au moyen de deux petits pendules (*fig.* 510), dont les supports *AB* et *CD* sont non conducteurs, et dont les boules de sureau *a* et *b* sont suspendues à des fils conducteurs communiquant à deux tiges métalliques, terminées par des boutons *m* et *n* : si l'on met le même corps électrisé en contact avec les boutons *m* et *n*, les balles *a* et *b* se repoussent, et si on met un des corps frottés en contact avec le bouton *m* et l'autre avec le bouton *n*, les deux balles s'attirent. On peut encore constater la répulsion qui existe entre deux corps électrisés de la même manière, au moyen du pendule double (*fig.* 511), dont les boules sont suspendues par un corps conducteur : en touchant avec un corps électrisé le bouton *m*, les deux balles entre lesquelles se partage l'électricité reçue se repoussent (*fig.* 512). Cette répulsion se manifeste en approchant seulement le corps électrisé de *m* ou des balles de sureau, parce que les balles sont alors électrisées par une influence à distance, dont il sera question plus tard.

886. Les électricités mises en liberté sur les deux corps frottés sont en proportions telles qu'elles peuvent se neutraliser complétement; on peut facilement vérifier ce fait au moyen de deux disques isolés et frottés (*fig.* 513) : si on les approche à la même distance, et dans deux directions opposées, d'un petit pendule, il reste en équilibre entre eux ; et si on les met en contact, tout signe d'électricité disparaît.

887. Ces deux espèces d'électricité qui se développent dans les corps sont fournies par le verre et la résine frottés avec des étoffes de laine : c'est pourquoi l'une a été désignée sous le nom d'*électricité vitrée*, et l'autre d'*électricité résineuse*. Mais comme le verre ne prend pas toujours la même espèce d'électricité, même quand il est frotté avec le même corps, nous employerons de préférence les désignations d'*électricité positive* et d'*électricité négative*, attendu que ces deux espèces d'électricité jouissent de propriétés opposées, comme les expériences précédentes le démontrent.

On fait ordinairement une expérience assez curieuse, fondée sur la double électrisation produite par le frottement. Deux personnes montent chacune sur un tabouret à pieds de verre; une d'elles avec une peau de chat frotte les habits de l'autre : après une légère friction, toutes deux sont électrisées, la première positivement, la seconde négativement, et toutes deux donnent des étincelles lorsqu'on en approche le doigt à une petite distance.

888. L'espèce d'électricité que prend un corps par le frottement sur un autre dépend de la nature des deux corps, de la température, de l'état des surfaces, jamais de la vitesse ou de la pression, à moins que dans les variations de vitesses ou de pressions il n'y ait beaucoup de chaleur dégagée ; le frottement de glissement produit aussi le même effet que le frottement de roulement, pourvu qu'il n'existe pas d'adhérence entre les deux corps. Nous reviendrons plus tard sur l'influence de ces différentes circonstances, en parlant des causes du développement de l'électricité.

889. *Les attractions et les répulsions électriques suivent la loi de la raison inverse du carré des distances.* C'est à Coulomb que l'on doit la découverte de cette loi importante. Nous allons décrire avec détail l'ingénieux appareil qu'il a employé. L'appareil de Coulomb est fondé sur un principe que nous avons déjà fait connaître (125), mais que nous devons rappeler. Si un fil métallique *AB* (*fig.* 514),

Digitized by Google

suspendu par une de ses extrémités, supporte par l'autre un levier horizontal *CD*, en faisant tourner le levier dans son plan, le fil se tordra, et le levier, abandonné à lui-même, reviendra en vertu de l'élasticité du fil à sa position initiale, autour de laquelle il oscillera pendant un certain temps et à laquelle il finira par s'arrêter. Coulomb a reconnu, par des expériences nombreuses, que, si la torsion ne changeait pas la contexture du fil, la force avec laquelle le fil tendait à se détordre, et, par conséquent, la force qu'il fallait employer pour l'empêcher de produire cet effet, était proportionnelle à l'angle de torsion, c'est-à-dire à l'angle formé par le levier *C'D'* avec sa première position *CD*.

L'appareil en question, que l'on désigne sous le nom de balance de Coulomb, est composé (*fig.* 515) d'un cylindre de verre *ABCD* d'environ un pied de diamètre, fermé par un plateau de verre *AC*, percé à son centre d'une ouverture circulaire sur laquelle est mastiqué un autre cylindre de verre *EF* d'un plus petit diamètre et d'une plus grande hauteur; à son extrémité se trouve une boîte en cuivre qui enveloppe le cylindre *EF* et peut tourner librement autour de lui; cette boîte est fermée supérieurement par une plaque métallique sur laquelle se trouve un cadran divisé en 360 parties égales; le centre de la plaque est percé d'une ouverture dans laquelle s'engage à frottement libre un cylindre de cuivre, qui sert d'axe à l'aiguille *ab* et qui est terminé supérieurement par un bouton destiné à le faire mouvoir. L'axe de l'aiguille porte inférieurement une pince que l'on serre au moyen d'un anneau. Cette partie de l'appareil porte le nom de *micromètre*. (La *fig.* 516 présente la coupe du micromètre et sa projection horizontale sur une plus grande échelle.) Un fil métallique très-fin *mn*, fixé supérieurement à la pince de l'axe de l'aiguille supporte à sa partie inférieure une petite masse métallique, à travers laquelle s'engage un fil de gomme laque *cd* dont une des extrémités est armée d'une petite boule de moelle de sureau, et l'autre d'un disque de papier doré qui lui fait équilibre. Le plateau *AC* est percé d'une autre ouverture *O* par laquelle on introduit une tige isolante, à l'extrémité de laquelle se trouve une petite boule *d'*; le cylindre *ABCD* est revêtu extérieurement, à la hauteur du levier *cd*, d'une bande de papier divisée en 360 parties égales. Le mouvement de la boîte du micromètre sert à amener le levier *cd* sur le zéro de la division de la cage *ABCD*, en laissant l'aiguille sur le zéro de sa division.

Pour trouver la loi des répulsions électriques, Coulomb plaça l'aiguille du micromètre sur le zéro de la division, et fit tourner la boîte jusqu'à ce que la boule *d*, dans sa position naturelle, touchât la boule *d'*, qui se trouvait en face du zéro de la division de la cage; ensuite il enleva de la cage la boule *d'*, lui donna une faible tension électrique et la remit en place: la boule *d*, en touchant la boule *d'*, partagea son électricité avec elle, et fut repoussée, et le levier *cd* resta en équilibre lorsque la distance fut telle que la force répulsive fit équilibre à la force de torsion. Dans une série d'expériences, l'angle du levier, avec sa première position mesurée sur la division du cylindre *ABCD*, était de 36°; en faisant mouvoir l'aiguille du micromètre de manière à faire rapprocher les boules, Coulomb reconnut que, pour diminuer de moitié leur distance, il fallait faire marcher l'aiguille de 126°, et pour que la distance des boules ne fût plus que le quart de ce qu'elle était d'abord, il fallait faire tourner la même aiguille de 567°. Il est évident que, dans ces deux dernières positions d'équilibre, la torsion du fil était égale à l'écart des deux boules, plus à l'angle décrit en sens contraire par le micromètre. Ainsi, dans ces trois opérations, les torsions étaient 36°, 18 + 126 et 9 + 567, ou bien 36, 144 et 576; or, ces nombres sont entre eux comme 1, 4, 16; et comme les distances étaient 1, 1/2, 1/4, il en résulte évidemment la loi énoncée. Dans ces expériences, il y a cependant trois causes d'erreurs: la première consiste en ce que la distance réelle des boules n'est pas mesurée par l'arc qui les

Digitized by Google

sépare, mais par sa corde; la seconde résulte de ce que, la force répulsive ne s'exerçant pas perpendiculairement au levier CD, une portion de cette force est détruite par l'obliquité du levier; la troisième consiste en ce que les corps chargés d'électricité en perdent continuellement par le contact de l'air, et que par conséquent la force répulsive doit diminuer pendant la durée des expériences. Les deux premières erreurs peuvent facilement se calculer, et en les introduisant dans les données des expériences citées, on trouve encore l'accord le plus satisfaisant avec la loi en question. Quant à la dernière, elle était très-petite le jour où furent faites les expériences, car les deux boules, repoussées à une distance de 30°, ne se sont rapprochées que d'un demi-degré en 2 minutes.

Soient B (*fig.* 517) la boule fixe, AC l'aiguille mobile. La force répulsive agit suivant BC. Pour la comparer à la force de torsion, il faut la décomposer en deux autres, l'une agissant suivant la tangente CT, l'autre dans la direction AC; on aura seulement à tenir compte de la première. En désignant par f la force agissant suivant BC, et par f' la force agissant suivant CT, par a l'angle BAC, on aura évidemment

$$f' = f\cos\frac{a}{2}.$$

En désignant par b le coefficient de torsion, par m l'angle de torsion, AC par l, l'attraction à l'unité de distance par f, et en admettant que la force suive la raison inverse du carré de la distance, on aura

$$mb = \frac{f\cos\frac{a}{2}}{BC^2} = \frac{f\cos\frac{a}{2}}{4l^2\sin^2\frac{a}{2}}, \quad \text{d'où} \quad \frac{f}{4l^2b} = m\left(\sin\frac{a}{2}\ \text{tang}\ \frac{a}{2}\right).$$

Le premier membre de cette dernière équation étant constant, le second doit l'être également, quel que soit a. Ainsi, pour vérifier la loi en question, il suffit de reconnaître que le produit $m\left(\sin\frac{a}{2}\ \text{tang}\ \frac{a}{2}\right)$ ne change pas avec m et a.

890. Les attractions électriques suivent la même loi que les répulsions : on peut le vérifier au moyen du même appareil; mais ces expériences exigent quelques précautions. Coulomb commençait par tendre verticalement, dans la cage $ABCD$ (*fig.* 515), un fil qui empêchait la boule d de toucher la boule fixe, et après avoir mis le levier cd en contact sans torsion avec le fil, il donnait une certaine tension électrique à la boule d', il tournait l'aiguille du micromètre de manière à éloigner le bras de levier cd du fil d'arrêt, et il observait les torsions correspondantes à des distances 1, 2, 4, etc. Coulomb trouva ainsi que les attractions suivaient exactement la loi des répulsions. Ces expériences démontrent l'exactitude de la loi lorsqu'un corps électrisé agit sur un corps à l'état naturel; elles démontrent également que la même loi se manifesterait si les corps étaient chargés d'électricité de nature contraire, car nous verrons plus tard que l'action d'un corps électrisé sur un autre à l'état naturel repose sur un développement d'électricité développé par influence.

Pour concevoir la nécessité de la nouvelle disposition dont il s'agit, supposons que, la boule d étant dans l'état naturel et en repos, on lui présente à une certaine distance la boule d' électrisée : la première se mettra en mouvement vers la seconde, et à mesure que leur distance diminuera, l'attraction augmentera en même temps que la force de torsion. Mais pour savoir si, avant le contact, il existera une position d'équilibre stable, il faut examiner la nature des deux forces qui varient. Soient AB (*fig.* 518) la distance des deux boules, A la

Digitized by Google

position de la boule mobile ; si nous représentons l'attraction à une distance quelconque $A'B$ par la perpendiculaire $A'm$, il est évident que les attractions, croissant en raison inverse du carré de la distance, seront représentées par les ordonnées de l'hyperbole équilatère XY, ayant pour asymptotes AB et BC, AX étant l'intensité de l'attraction à la distance AB; la force de torsion pouvant être considérée comme croissant proportionnellement à la distance rectiligne des deux boules, quand les écarts sont très-petits, cette force sera représentée par les ordonnées d'une droite passant par le point A, et la tangente de l'angle de cette droite avec AB sera proportionnelle à l'intensité de la force de torsion. A l'inspection de la figure, on voit que l'existence d'une position d'équilibre stable dépend de l'inclinaison de la droite AM sur AB; car si la droite ne coupe pas la courbe XY, il est évident qu'à aucune distance la force de torsion ne pourra égaler l'attraction ; mais si cette droite coupe la courbe aux points m et n, il est évident qu'à la distance $A'B$ il y aura un équilibre stable, et à la distance $A''B$ un équilibre instantané. Ainsi, en prenant des fils dont la force de torsion soit très-grande relativement à l'attraction des deux boules, et en plaçant la boule d à une certaine distance angulaire de la doule d', il existera toujours une position d'équilibre stable que l'on pourra observer ; et en faisant mouvoir l'aiguille du micromètre de manière à faire rapprocher les boules, on aurait, comme dans les expériences de la répulsion, une série de positions d'équilibre dont on comparerait les distances et les torsions ; mais comme il est indispensable, pour conserver à l'appareil toute sa sensibilité, d'avoir des fils dont la force de torsion soit très-faible, et que, d'ailleurs, la grande mobilité du levier produit souvent de grandes oscillations, la boule mobile pourrait toucher la boule fixe, ce qui changerait l'attraction en répulsion : il vaut mieux alors employer le procédé suivi par Coulomb.

891. Coulomb a encore vérifié la loi que suivent les attractions et les répulsions électriques, par un procédé différent qu'il est bon de connaître. Il remplaçait le fil métallique de suspension par un fil de soie tel qu'il sort du cocon (la force de torsion était tellement petite, que celle d'une circonférence équivalait au poids d'un cent-vingt-millième de grain) ; à l'extrémité du levier, en gomme laque, il plaçait un petit cercle vertical de papier doré, et à une certaine distance il disposait un globe métallique isolé à l'état naturel, ou chargé d'électricité de nature différente de celle du disque : le levier oscillait horizontalement par l'attraction du globe, comme un pendule ordinaire oscille verticalement par la pesanteur. Comme les amplitudes des oscillations étaient fort petites, que l'aiguille était très-courte et éloignée du centre du globe d'une quantité fort considérable comparativement à sa longueur, il en résultait que les lignes menées de différents points du disque de papier au centre du globe, dans les différentes positions du disque pendant une même oscillation, pouvaient être considérées comme égales et parallèles. Alors on trouve par le calcul que, dans la supposition que l'attraction varie en raison inverse du carré de la distance, la durée des oscillations devait croître proportionnellement à la distance. Coulomb trouva, en effet, que les nombres d'oscillations dans le même temps étaient en raison inverse des distances.

En effet, la formule

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

que nous avons donnée (58), est ici exactement applicable ; seulement il faut y remplacer g par $\frac{F}{D^2}$, F étant l'intensité de l'attraction à l'unité de distance, et D la distance du disque doré au centre du globe électrisé. La formule devient alors

$$T = D\pi \sqrt{\frac{l}{F}}.$$

Digitized by Google

La même méthode pourrait également servir pour déterminer la loi des répulsions, car en communiquant au globe et à la plaque des électricités de même nature, l'aiguille serait repoussée et oscillerait en vertu de cette répulsion dans une position diamétralement opposée à la première.

892. *Les forces attractives ou répulsives des corps électrisés sont proportionnelles aux produits des quantités d'électricités libres renfermées dans les corps qui agissent les uns sur les autres.* Pour constater cette loi, dont la découverte est encore due à Coulomb, on procède de la manière suivante. On électrise une balle de sureau égale à celle qui est fixée à l'extrémité du levier de la balance, on introduit cette boule dans la cage : après le contact les boules se repoussent, et on mesure la torsion à l'instant de l'équilibre; ensuite après avoir touché une des boules pour la remettre à l'état naturel, on réitère l'expérience, et l'on mesure la torsion correspondante à l'équilibre à la même distance que dans la première opération : on trouve que la torsion est quatre fois plus petite dans ce dernier cas que dans le premier ; ce qui est d'accord avec la loi que nous avons énoncée : car en représentant par a la quantité d'électricité donnée d'abord à la boule, après le partage avec la boule de la balance, chacune renfermait une quantité d'électricité égale à $\frac{a}{2}$, et d'après la loi énoncée, leur force répulsive était proportionnelle à $\frac{a}{4}$; et, dans le second cas, après le nouveau partage, chacune possédait une quantité d'électricité égale à $\frac{a}{4}$, et la force répulsive était proportionnelle à $\frac{a^2}{16}$. On voit d'après cela que les attractions et les répulsions des corps électrisés sont les mêmes que si ces actions provenaient des actions de même nature de molécules étrangères aux corps dont la présence dans ces corps serait la cause de leur faculté électrique.

Il résulte aussi de ce qui précède que la quantité d'électricité libre que possède un corps est proportionnelle à la racine carrée de la torsion qui mesure, dans la balance de Coulomb, la répulsion à la même distance sur un corps de même dimension avec lequel il a partagé son électricité. Ce rapport serait encore le même si les corps entre lesquels s'exerce la répulsion avaient des dimensions différentes, parce que le partage de l'électricité aurait lieu dans un rapport constant, et par conséquent le produit des quantités d'électricité renfermées dans les deux corps serait égal à un nombre constant, multiplié par le carré de la quantité d'électricité de l'un d'eux.

893. *L'électricité dans un corps conducteur réside entièrement à sa surface.* Ce fait résulte nécessairement des expériences suivantes. Si on électrise une sphère creuse (*fig.* 519), percée d'une ouverture circulaire, et si on introduit dans son intérieur un petit disque de papier doré m, supporté par un manche de gomme laque, de manière qu'il touche la surface concave, le disque, après sa sortie, est électrisé, si on a eu soin d'éviter qu'il touche les bords de l'orifice en entrant et en sortant. Si on électrise une sphère métallique suspendue à un fil de soie (*fig.* 520), et si on l'enveloppe avec deux hémisphères également métalliques, soutenues par des manches isolants, en les enlevant rapidement, la sphère perd toute son electricité primitive.

894. *L'électricité est retenue à la surface des corps par l'air environnant.* En effet, lorsqu'on place sous le récipient d'une machine pneumatique un corps isolé et électrisé, et qu'on fait le vide, toute l'électricité du corps se dissipe. Cependant si le corps est mauvais conducteur, il conserve encore dans le vide une certaine quantité d'électricité.

Digitized by Google

895. *Lorsqu'un corps conducteur isolé est garni d'une pointe métallique, l'électricité dont on le charge s'écoule par la pointe.* Ce fait résulte de ce qu'un corps conducteur isolé, armé d'une pointe, ne peut pas être électrisé par le contact avec un tube de verre chargé d'électricité par le frottement, et de ce que, lorsqu'on le met en contact avec un corps conducteur isolé, chargé d'électricité, elle disparaît bientôt dans les deux corps.

896. Lorsqu'un corps conducteur isolé et terminé par une pointe peut se mouvoir facilement en sens contraire de l'écoulement de l'électricité par la pointe, le mouvement a toujours lieu. La manière la plus simple de faire cette expérience consiste à prendre une aiguille métallique terminée par deux pointes recourbées, à angle droit dans le même plan, et garnie à son milieu d'une chappe, que l'on place sur une pointe isolée, communiquant avec une source quelconque d'électricité : si le plan de l'aiguille et des pointes n'est pas vertical, l'aiguille tourne d'une manière continue, tant que la source fournit de l'électricité au support. Ce phénomène, tout à fait analogue à ceux que présente l'écoulement des liquides et des gaz, s'expliquait en admettant que l'électricité libre à la surface d'un corps exerce sur l'air une certaine pression, que dans l'état d'équilibre toutes ces pressions se détruisent, mais qu'aussitôt que l'électricité s'écoule par un point, la résultante des pressions exercées sur tous les autres points obtient tout son effet. Nous reviendrons plus tard sur ce phénomène, qui paraît dépendre d'une tout autre cause.

897. *Développement de l'électricité par influence.* Soit A (*fig.* 521) un corps conducteur isolé, et B un corps aussi conducteur isolé, et garni dans toute sa longueur de fils doubles portant à leurs extrémités de petites boules de moelle de sureau. Si on électrise le corps A, et si on le place à une petite distance d'une des extrémités du corps B, on observe les phénomènes suivants. 1° Les boules de sureau s'écartent, et la divergence décroît des extrémités au centre : par conséquent le cylindre B est électrisé, et l'électricité libre en chaque point augmente du centre aux extrémités. 2° Les électricités développées dans les deux moitiés du cylindre sont de nature différente : celle qui existe dans la partie la plus voisine de A est de nature contraire à celle de A, et celle qui se trouve sur la partie la plus éloignée est de même nature. 3° En rapprochant davantage le corps A de B, la divergence des boules augmente, et elle diminue si on l'éloigne ; mais le point d'indifférence, qui ne coïncide jamais avec le milieu de B, s'en approche d'autant plus que le corps A est plus éloigné. En touchant le corps A avec le doigt, tout indice d'électricité disparaît dans A et B. 4° Lorsque le corps B est électrisé par influence, qu'on le touche en n avec un corps conducteur d'une petite dimension et isolé, et qu'on éloigne le corps A, ou qu'on dissipe son électricité en le touchant avec le doigt ou avec un corps bon conducteur communiquant avec le sol, on trouve le corps B chargé de l'espèce d'électricité qui se trouvait en m. De même, si on avait touché le corps B en m après l'éloignement de A, le corps B se trouverait chargé de l'espèce d'électricité qui existait en n ; mais si on touche le corps B en m ou en n, avec un corps conducteur communiquant avec le sol, le corps B, après l'éloignement de A, reste chargé de l'espèce d'électricité contraire à celle qui se trouvait dans A. 5° Enfin, si on touche le corps A aux points r et s avec un corps conducteur de petite dimension et isolé, tel qu'une boule de moelle de sureau soutenue par un cylindre de verre ou de gomme laque, on trouve que, quand le corps A n'agit pas sur B, le petit conducteur prend la même charge électrique aux points r et s, et que, dans le cas contraire, il prend au point r une charge plus grande qu'au point s ; et que la différence est d'autant plus grande que les corps A et B sont plus voisins. Les corps mauvais conducteurs ne se comportent pas de la même manière : ils s'électrisent difficilement par influence ; mais quand ils

Digitized by Google

l'ont été, ils conservent l'état électrique qu'ils ont acquis lorsqu'ils sont soustraits à l'influence de la cause qui la produit.

898. *Hypothèses admises pour expliquer les phénomènes électriques.* Pour expliquer les phénomènes que nous venons d'exposer, on a admis 1° qu'ils proviennent de deux fluides très-subtils, dont les molécules similaires se repoussent, et celles de nature différente s'attirent; 2° que tous les corps renferment ces deux fluides à l'état de combinaison, et ne peuvent alors manifester leur présence; 3° que ces fluides sont séparés par le frottement, et se portent l'un dans un corps, l'autre dans l'autre; 4° que les corps sont plus ou moins bons conducteurs. Ces hypothèses, comme nous allons le faire voir, satisfont complétement aux faits observés.

899. *Explication des phénomènes électriques dans l'hypothèse des deux fluides.* Lorsqu'on frotte deux corps, les fluides neutres qu'ils contiennent sont en partie décomposés, et l'un des corps prend le fluide électrique positif, l'autre le fluide électrique négatif; mais un des corps ne peut conserver l'électricité dont il s'est emparé qu'autant qu'il est mauvais conducteur ou isolé. Quand un corps bon conducteur est chargé d'électricité, les molécules électriques, étant douées d'une force répulsive, s'éloignent les unes des autres jusqu'à ce qu'elles rencontrent un obstacle : alors elles s'accumulent à la surface même du corps, où l'air, par son défaut de conductibilité, s'oppose à leur dissémination.

M. Poisson, en partant du principe que les attractions et les répulsions électriques ont lieu en raison inverse du carré de la distance, et que, dans un corps à la surface duquel l'électricité est en équilibre, l'action totale de la couche électrique sur un point quelconque de l'intérieur du corps doit être nulle, afin qu'aucune nouvelle portion d'électricité ne soit développée, est parvenu à des formules qui représentent la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs électrisés. Il résulte de ces formules que l'électricité libre forme à la surface du corps une couche extrêmement mince, d'une densité constante, dont l'épaisseur, proportionnelle en un même point à la quantité d'électricité que renferme le corps, varie en général d'un point à un autre suivant une loi qui dépend des rayons de courbure de la surface, de telle manière qu'elle est plus grande dans les points de la surface où les rayons de courbure sont les plus petits, et que, si la surface était garnie d'une pointe à son extrémité, l'épaisseur de la couche y serait infinie. Mais cette couche électrique, appuyée contre l'air qui environne le corps, exerce nécessairement sur cet air une certaine pression; et le calcul fait voir que cette pression, qu'on désigne sous le nom de *tension*, varie en chaque point proportionnellement au carré de l'épaisseur de la couche électrique, et que la résultante totale de ces pressions est nulle, ou, en d'autres termes, que dans une direction donnée il y a toujours deux pressions égales et opposées, qui se détruisent, de sorte que, quand l'électricité est en équilibre, ces pressions ne peuvent imprimer aucun mouvement au corps. Mais si le corps renferme une pointe, la pression exercée à son extrémité est toujours suffisante pour vaincre la résistance de l'air : alors l'électricité s'écoule, et la pression opposée à la direction de l'écoulement obtient tout son effet, si le corps n'oppose pas une trop grande résistance au mouvement. Nous ajouterons que les tensions observées sur les différents points d'un corps s'accordent parfaitement avec celles qui résultent du calcul.

Les circonstances qui accompagnent le développement de l'électricité par influence s'expliquent aussi facilement dans l'hypothèse admise. En effet, lorsque le corps *A* (*fig.* 521) électrisé, par exemple positivement, est placé à une petite distance du corps *B* conducteur et isolé, l'électricité de *A* décompose le fluide neutre de *B*, attire dans la partie la plus voisine l'électricité négative, et refoule dans la partie la plus éloignée l'électricité positive. La tension devra être plus grande en *m* qu'en *n*, et

Digitized by Google

comme le corps *B* renferme la même quantité d'électricité positive et négative, la ligne neutre devra évidemment être plus voisine de *m* que de *n*, et d'autant plus que le corps *A* sera plus près, et la quantité d'électricité mise en liberté devra nécessairement diminuer à mesure qu'on éloignera davantage les deux corps. On conçoit facilement que, si on touche le corps *B* en un point quelconque avec un corps conducteur isolé, quand on aura éloigné le corps *A*, et que les deux fluides qui ont été séparés par influence se combineront, il manquera pour former du fluide neutre toute l'électricité qu'on a enlevée ; et par conséquent le corps *B* conservera une quantité d'électricité libre, égale, et opposée à celle qui a été enlevée. Enfin, si on touche le corps *B* en un point quelconque avec un corps conducteur communiquant avec le sol, lorsqu'il est soumis à l'influence du corps *A*, après l'éloignement ou la neutralisation de l'électricité de *A*, *B* reste chargé d'électricité contraire : en effet, si le contact a lieu au point *n*, la chose est évidente ; mais si la communication avec le sol est établie au point *m*, c'est encore le fluide positif qui s'écoule, car le corps qui établit la communication éprouve par influence la même décomposition que *B*, mais la décomposition est plus complète, attendu que son électricité positive s'écoule dans le sol, tandis qu'elle s'accumule à l'extrémité *n* de *B*, et diminue par son influence la quantité d'électricité neutre qui serait décomposée sans cette circonstance : alors une partie du fluide négatif du conducteur pénètre dans le corps *B*, neutralise l'électricité positive accumulée en *n*, et, après la suppression du conducteur, le corps *B* reste chargé négativement. Quant aux variations de tension que le corps *A* éprouve dans les parties les plus voisines et les plus éloignées de *B*, quand on augmente ou quand on diminue la distance des deux corps, elle provient évidemment de l'attraction exercée par l'électricité de *B* sur celle de *A*, dont l'effet est d'attirer cette dernière électricité dans la partie du corps la plus voisine de *B*, et d'autant plus que la distance est plus petite.

900. Nous pouvons maintenant expliquer les attractions et les répulsions apparentes des corps électrisés. Supposons deux corps de forme sphérique *A* et *B*. Il peut se présenter un grand nombre de cas, suivant que l'un ou l'autre ou tous deux sont bons ou mauvais conducteurs, et suivant l'espèce d'électricité dont ils sont chargés ; nous n'examinerons qu'un petit nombre de ces cas, l'explication des autres s'en déduira facilement. Admettons d'abord que les deux corps soient mauvais conducteurs et chargés d'électricités différentes : les couches électriques étant retenues à leur surface par la force inconnue qui empêche la conductibilité, ainsi que par la résistance de l'air, et ayant la propriété de s'attirer, elles entraîneront nécessairement dans leur mouvement les masses auxquelles elles sont adhérentes, pourvu que le poids de ces masses ou toute autre résistance ne s'y oppose pas ; et, pendant le rapprochement, chacun des corps conservera sensiblement le même état électrique.

Si *A* et *B* sont tous deux bons conducteurs et chargés d'électricités différentes, les deux couches électriques qui sont à leur surface n'y sont maintenues que par la résistance de l'air : par conséquent, les corps ne participeront aux mouvements que tendent à prendre leurs couches électriques qu'autant que leurs poids seront plus faibles que les résistances que peuvent vaincre les attractions, et encore qu'autant que la pression exercée sur l'air par ces couches sera plus petite que sa résistance, car autrement les électricités abandonneraient les deux corps pour se combiner. Dans le cas dont il s'agit, à mesure que les sphères *A* et *B* se rapprochent, les épaisseurs des couches électriques augmentent dans les points les plus voisins, non-seulement par l'électricité libre que les corps possédaient d'abord et qui s'accumule dans les points les plus voisins, mais encore par une décomposition croissante d'électricité natu-

Digitized by Google

relle dans le corps qui contient le moins d'électricité libre : alors, à une certaine distance dépendante des épaisseurs initiales de ces couches, les électricités abandonnent toujours les deux corps.

Si, les deux corps étant bons conducteurs, un seul se trouvait électrisé, ce dernier opérerait à distance la décomposition du fluide naturel de l'autre; sa surface serait alors recouverte de deux couches électriques de natures différentes, partant d'un cercle commun perpendiculaire à la ligne qui joint les centres des deux sphères, où l'épaisseur commune serait nulle et de là irait en croissant jusqu'aux points placés sur la ligne des centres. L'attraction apparente des deux corps résulterait de l'attraction de l'électricité de *A* sur la couche électrique de *B* la plus voisine, et qui serait de nature contraire, diminuée de la répulsion exercée par l'électricité de *A* sur l'électricité de même nom développée par influence dans *B* et refoulée dans la partie la plus éloignée.

Enfin, si un des corps seulement était bon conducteur et électrisé, l'autre étant dans l'état naturel, l'attraction serait lente à se développer, et d'autant plus que le dernier corps serait plus mauvais conducteur, parce que la séparation des électricités par influence à distance ne s'y ferait que très-difficilement; c'est ce qu'il est très-facile de vérifier en présentant un corps électrisé à une boule de gomme laque suspendue à l'extrémité d'un fil : l'attraction ne se manifeste qu'au bout d'un certain temps.

La répulsion de deux corps bons conducteurs présente un phénomène singulier dont l'explication se déduit facilement de ce qui précède. Si deux corps chargés de la même espèce d'électricité sont forcés à se rapprocher, il arrive toujours, lorsqu'un des corps est très-petit relativement à l'autre, qu'à une certaine distance la répulsion se change en attraction. La cause de ce changement réside dans le développement de l'électricité par influence : car, l'électricité de nature contraire à celle qui existe dans le corps le plus volumineux, et qui se développe dans le plus petit, croissant à mesure que la distance diminue, il doit nécessairement exister une distance à laquelle cette attraction est plus grande que la répulsion provenant de la couche électrique qui existait d'abord, jointe à celle de même espèce qui a été produite par influence, mais qui est refoulée dans la partie du corps la plus éloignée.

901. Il résulte de ce qui précède que toutes les attractions et répulsions apparentes des corps par l'influence électrique sont uniquement le résultat des attractions et des répulsions des couches électriques qui existent ou se développent à leur surface. Les corps participent à ces mouvements, parce que les couches électriques sont maintenues à leurs surfaces, ou par l'adhérence et par la résistance de l'air s'ils sont mauvais conducteurs, ou par la résistance de l'air seulement s'ils sont bons conducteurs.

Quant aux explosions électriques, elles ont toujours lieu entre deux corps électrisés d'une manière différente, ou directement ou par l'influence de l'un d'eux, lorsque, par la diminution de distance qui les sépare, les tensions sur les points voisins deviennent assez puissantes pour vaincre la résistance de l'air : alors les électricités traversent l'air pour se réunir et former du fluide neutre. Ce phénomène est accompagné de chaleur et de lumière, et, quand il a lieu à travers nos organes, d'une sensation pénible plus ou moins vive, qui se fait sentir principalement dans les articulations. Nous examinerons plus tard les circonstances qui accompagnent l'explosion. Quant à l'influence de l'électricité sur nos organes, nos connaissances se réduisent au fait que nous venons de citer.

Dans l'explication que nous venons de donner des phénomènes électriques, nous avons dit que les tensions observées sur les différents points d'un corps s'accordaient

Digitized by Google

parfaitement avec les tensions calculées ; nous devons exposer maintenant la méthode qui a été employée pour faire ces expériences et les principaux résultats du calcul et de l'observation. Mais comme les expériences exigent toujours un certain temps, et que l'électricité dont un corps est chargé se dissipe avec le temps, il faut nécessairement corriger les résultats obtenus successivement sur différents points, de manière à les ramener à ce qu'ils auraient été si les expériences eussent été simultanées. Ainsi, nous nous occuperons d'abord des différentes causes de la déperdition de l'électricité.

902. *Causes de la déperdition de l'électricité.* Lorsqu'un corps conducteur isolé est chargé d'électricité, sa tension électrique diminue continuellement et finit par s'anéantir au bout d'un certain temps. Les causes de cette déperdition et les lois de leur influence sont importantes à connaître, afin de les éviter quand cela est possible, et, dans le cas contraire, de corriger les résultats que l'on obtient dans toutes les expériences qui exigent un certain temps. Par exemple, dans les expériences de Coulomb pour déterminer la loi des répulsions électriques, si la perte de l'électricité avait été sensible dans l'intervalle des trois observations, les trois résultats n'auraient pu être comparés entre eux qu'après que les tensions correspondantes aux deux dernières auraient été ramenées par le calcul à ce qu'elles auraient été si la tension n'avait pas diminué.

Les causes de déperdition de l'électricité dans un corps conducteur isolé sont : 1° l'humidité que l'air dépose sur les corps isolants, et qui les rend alors conducteurs; 2° la conductibilité plus ou moins grande des supports, car il paraît qu'il n'existe dans la nature aucun corps qui soit parfaitement isolant; 3° le contact de l'air : car dans l'air parfaitement desséché par du chlorure de calcium ou de l'acide sulfurique concentré, l'électricité se dissipe, quoique beaucoup plus lentement que dans l'air renfermant de la vapeur d'eau. La première cause de déperdition peut facilement être évitée en essuyant et desséchant les corps non conducteurs; et opérant dans une atmosphère qui ne soit pas saturée d'humidité; mais il n'en est pas de même des deux dernières : il faut, par conséquent, en déterminer les lois.

903. *Loi de la déperdition de l'électricité par la seule influence de l'air.* Pour déterminer la loi dont il est question, il fallait d'abord un support qui isolât parfaitement le corps électrisé, afin de le soustraire à toute influence étrangère à celle de l'air. Coulomb, après de nombreux essais, reconnut qu'un cylindre de cire d'Espagne ou de gomme laque d'une demi-ligne de diamètre et de dix-huit à vingt lignes de longueur suffit pour isoler une balle de sureau qui a cinq à six lignes de diamètre, surtout lorsque la tension électrique n'est pas considérable. D'après cela, Coulomb fixa, dans sa balance, une balle de sureau à l'extrémité d'un levier en gomme laque, et il plaça dans la cage *ABCD*, par l'ouverture *O* (*fig.* 515), une autre boule de sureau, isolée de la même manière au moyen d'un cylindre de gomme laque; cette dernière fut faiblement électrisée, et, les deux boules s'étant partagé cette électricité, celle de la balance fut repoussée. Dans une des séries d'expériences, la première répulsion avait été de 40°, et leur distance fut ramenée à 20° en tournant l'aiguille du micromètre de 140° : la force de torsion était alors de 160°. A mesure que la déperdition avait lieu, les deux boules se rapprochaient; mais, pour estimer la perte de réaction au bout d'un certain temps, on diminuait la torsion de manière à ramener les boules à leur distance initiale. Il est évident que la perte était alors mesurée par le mouvement rétrograde que l'on avait imprimé à l'aiguille. Ainsi, dans l'expérience citée, au bout de trois minutes il avait fallu détordre le fil de 30°, et la torsion totale ne se trouvait plus que de 130°. Coulomb déterminait ensuite, au moyen des résultats de ces expériences, la perte d'électricité rapportée à la réaction

Digitized by Google

moyenne entre deux observations consécutives : par exemple, dans les observations précédentes, les réactions successives étant 160° et 130°, dont la moyenne est 145° et la perte 30° pour trois minutes, la perte pour une minute, relativement à la tension moyenne, était $\frac{10}{145}$.

A la suite d'un grand nombre d'expériences, Coulomb a reconnu les lois suivantes :

1° La déperdition de l'électricité par le contact de d'air, dans les mêmes circonstances, produit à chaque instant une diminution dans la force de réaction, qui est une même fraction de la réaction du corps au commencement de cet instant, et dans un petit intervalle, une même fraction de la réaction moyenne au commencement et à la fin. La même loi est applicable aux tensions d'un même corps, puisque les tensions sont, comme les réactions, proportionnelles aux carrés des épaisseurs des couches électriques (892, 899).

Au moyen de cette loi, qui est la même que celle de Newton pour le refroidissement (654), on peut calculer la réaction A, après le temps t, quand on connaît la réaction A_0 à l'origine : la formule est alors la même que celle de la page 35 du 1er volume :

$$\log A_t = \log A_0 - \frac{a}{M}\, t. \qquad (a)$$

a étant un coefficient dépendant de l'état hygrométrique de l'air, et qui devra être déterminé pour chaque série d'expériences par des observations préliminaires, et dont on substituerait les résultats dans la formule, M est toujours le module des tables ordinaires, 2,302585.

Dans l'équation précédente nous avons représenté par A_0 et A_t les réactions de deux corps électrisés ; et c'est réellement à ces réactions, et non pas aux quantités d'électricité des boules, que la loi est applicable. Mais comme ces quantités d'électricité sont proportionnelles aux racines carrées des réactions, en les désignant par T_0 et T_t, on aura

$$\frac{T_t^2}{T_0^2} = \frac{A^t}{A_0}, \quad \text{d'où l'on déduira } \log T_t = \log T_0 - \frac{at}{2M}.$$

2° La déperdition croît avec le degré d'humidité de l'air. Dans les jours secs, la perte d'électricité est d'environ $\frac{1}{60}$ par minute ; dans les temps très-humides, elle est d'environ $\frac{1}{10}$.

3° Dans l'air au même degré d'humidité, la déperdition d'électricité est la même, quelles que soient la grosseur, la forme et la nature des corps, pourvu que la tension soit très-petite. Coulomb a vérifié cette loi avec un globe d'un pied de diamètre, avec des cylindres de différentes dimensions et avec des cercles de papier doré, etc.

Il résulte de ces lois que, lorsqu'on doit faire des expériences sur les tensions électriques des corps, il faut commencer par déterminer, par des observations préliminaires, la fraction qui représente la perte de l'électricité pendant une minute, et corriger de cette perte toutes les observations.

Il est important de se souvenir qu'à chaque instant les épaisseurs des couches électriques sont proportionnelles aux racines carrées des réactions et des tensions.

904. *Déperdition par les supports.* Nous avons dit précédemment qu'il n'existe aucun corps qui ne conduise plus ou moins l'électricité ; on peut facilement constater ce fait en formant des cylindres de différentes matières non conductrices, et en

Digitized by Google

les mettant en contact avec des corps électrisés : tous, après la séparation, auront acquis une certaine tension électrique, de même nature que celle du conducteur et que l'on pourra facilement reconnaître en les présentant à un électroscope. Il résulte des observations nombreuses de Coulomb que la faculté conductrice des corps mauvais conducteurs croît rapidement avec la tension électrique, et diminue avec leur longueur, de sorte qu'à chaque tension électrique correspond dans chacun de ces corps une certaine longueur pour laquelle l'isolement est complet. Coulomb a trouvé pour les tensions et les longueurs correspondantes à l'isolement complet la loi suivante : les longueurs auxquelles un même corps non conducteur de forme cylindrique commence à isoler complétement sont proportionnelles aux carrés des tensions électriques.

905. Certains corps non conducteurs chargés d'électricité qu'on y a développée par le frottement conservent pendant très-longtemps leurs tensions électriques, malgré le contact de l'air et des corps conducteurs : tels sont principalement les gâteaux de résine, qui, électrisés au moyen d'une peau de chat, sont encore électriques après plusieurs mois. Cet effet doit tenir, du moins en partie, à la difficulté que l'électricité éprouve à se dégager de ces corps; mais il y a encore une autre cause qui concourt avec celle-là, et dont il sera question à l'article des condensateurs.

906. *Détermination du rapport des tensions dans les différents points de la surface d'un corps conducteur électrisé.* Le procédé employé par Coulomb pour déterminer les tensions des différents points de la surface d'un corps est fondé sur ce principe : si on met en contact avec un point quelconque de la surface d'un corps électrisé un petit disque de papier doré, soutenu par un manche de gomme laque, la tension qu'il acquerra par le contact sera proportionnelle à celle du point du corps qui a été touché. Coulomb vérifia ce principe de plusieurs manières. Il prit d'abord un cylindre conducteur isolé et électrisé, et il le toucha en un point de sa surface avec le disque, qu'il porta dans la balance pour en mesurer la tension; il le toucha de nouveau à plusieurs reprises, à plusieurs minutes de distance, et au même point, et, chaque fois, il mesura la tension acquise par le plan d'épreuve : en comparant les tensions acquises successivement par le disque avec les tensions que le cylindre devait avoir aux mêmes instants par la déperdition due à l'influence de l'air, il trouva l'accord le plus satisfaisant. Il chargea d'électricité un corps conducteur isolé, et le toucha d'abord en un certain point avec le plan d'épreuve, dont la tension fut déterminée à l'aide de la balance de torsion; ensuite il mit le conducteur en contact avec un corps isolé parfaitement égal pour sa nature, sa forme et ses dimensions, et, après la séparation, touchant de nouveau le premier au même point, il reconnut que, dans cette dernière expérience, la tension acquise par le disque était le quart de celle qu'il avait acquise par le premier contact; or, les tensions du cylindre en un même point devaient nécessairement être quatre fois plus grandes dans le premier cas que dans le second (892) : car le corps ayant été mis en contact avec un autre parfaitement égal, l'électricité avait dû se partager également entre eux, et par conséquent après le contact il devait avoir seulement la moitié de l'électricité qu'il possédait d'abord. Ainsi les tensions du disque sont proportionnelles à celle du point touché.

Il est même facile de reconnaître que, lorsqu'un petit plan d'épreuve est mis en contact avec une surface électrisée, le petit plan d'épreuve, après la séparation, aura une tension précisément égale au quart de celle que possédait l'élément de la surface qui a été touché. En effet, quand le plan d'épreuve est tangent à la surface, il se confond avec l'élément qu'il touche, il en prend en quelque sorte la place, et, quand on le retire, on obtient le même effet que si on avait découpé un élément de même épaisseur et de même étendue, et qu'on l'eût enlevé. Mais comme, aussitôt qu'il est séparé,

Digitized by Google

la couche électrique, qui n'existait que sur une des surfaces, se répand sur toutes les deux, l'épaisseur de la couche se trouve diminuée de moitié.

Ce principe une fois reconnu, la détermination des tensions des divers points d'un corps électrisé ne présente aucune difficulté : car il suffit de le toucher successivement aux différents points dont on veut avoir les tensions, et de mesurer chaque fois, au moyen de la balance de Coulomb, la tension du disque. On doit seulement avoir soin de prendre pour soutenir le disque une gomme laque bien isolante; il faut pour cela qu'étant mise en contact avec un corps électrisé, après la séparation elle ne conserve aucune trace d'électricité. Il faut de plus tenir compte de la déperdition de l'électricité par le contact de l'air ; ou, ce qui est beaucoup plus simple, après avoir déterminé la tension de deux points, déterminer de nouveau celle du premier, en laissant entre la seconde et la troisième observation le même temps qu'entre la première et la seconde, et prendre pour tension du premier point la moyenne des deux observations.

907. Par les moyens d'observations que nous venons de décrire, Coulomb a obtenu les résultats suivants. Dans les corps sphériques, la tension est la même dans tous les points, et ce sont les seuls pour lesquels l'uniformité de tension subsiste. Dans les lames prismatiques ou les cylindres très-allongés, la tension est sensiblement la même du milieu jusqu'à un pouce de distance des extrémités ; au delà elle croît avec une grande rapidité. Dans les plaques circulaires, les variations de tension ne se manifestent qu'à 3 ou 4 pouces du bord, et à partir de cette limite elle croît rapidement à mesure qu'on s'approche du bord, et les points également distants du centre ont la même tension. Dans un ellipsoïde, la tension aux extrémités du grand axe est plus grande que dans tous les autres points, et la différence de tension aux extrémités des axes augmente avec le rapport de leur longueur. Enfin, dans les corps terminés par des pointes, la tension à l'extrémité des pointes y est très-grande et d'autant plus que les pointes sont plus aiguës. D'après M. Poisson, les tensions électriques aux extrémités des axes d'un ellipsoïde sont proportionnelles aux longueurs des axes qui passent par ces points, et par conséquent si un des axes était infini par rapport aux deux autres, ce qui transformerait l'extrémité de l'ellipsoïde en une pointe, la tension y serait infinie.

Nous allons maintenant citer quelques cas particuliers pour lesquels M. Poisson a pu déterminer les tensions, et qui ont été identiques avec celles obtenues par l'expérience.

908. Lorsque deux sphères de diamètres différents sont mises en contact et électrisées dans cet état, l'épaisseur de la couche électrique est nulle au point de contact; à partir de ce point, l'électricité est très-faible sur toutes les deux jusqu'à une assez grande distance; lorsqu'elle commence à devenir sensible, elle est d'abord plus intense sur la plus grande des deux surfaces, mais elle croît ensuite plus rapidement sur la plus petite; et au point diamétralement opposé à celui du contact, l'épaisseur de la couche électrique sur cette dernière sphère est toujours plus grande qu'elle ne l'est au même point sur l'autre sphère. Le rapport des épaisseurs de la couche électrique, dans ces deux points, augmente à mesure que le rayon de la petite sphère diminue; mais cet accroissement n'est pas indéfini; il tend au contraire vers une limite constante que le calcul détermine, et qui est égale à 4,2.

Lorsqu'on sépare les deux sphères, chacune d'elles emporte la totalité de l'électricité dont elle était recouverte, et après qu'on les a soustraites à leur influence mutuelle, cette électricité se distribue uniformément sur chaque sphère; le calcul fait voir que l'épaisseur de la couche électrique sur la plus petite des deux sphères est plus grande que sur l'autre, et que le rapport de la plus grande épaisseur à la plus

Digitized by Google

petite augmente à mesure que le plus petit rayon décroît. Mais ce rapport n'augmente pas indéfiniment à mesure que le rayon de la petite sphère décroît ; il s'approche continuellement d'une valeur égale à 1,65 ; de sorte que, quand une sphère est mise en contact avec une autre d'un diamètre très-petit par rapport au sien, l'électricité se partage entre elles à peu près dans le rapport de cinq fois la surface de la petite sphère, et trois fois la grande.

Lorsque deux sphères d'inégale dimension ont été électrisées en contact, nous avons déjà dit que la tension au point de contact était nulle; mais si on les écarte, une partie de l'électricité de la petite sphère se décompose, et le point où le contact a eu lieu se charge d'une électricité contraire à celle de la grande sphère; cet effet diminue à mesure qu'on écarte les sphères, et devient nul à une distance qui dépend du rapport de leur rayon; au delà de cette distance, le point où s'est fait le contact se retouve dans l'état naturel; enfin, à une distance plus grande encore, ce point se charge de la même espèce d'électricité que le reste de la sphère dont il fait partie. Ces phénomènes sont particuliers à la petite sphère; sur la grande l'électricité est toujours et partout de même nature qu'à l'instant du contact.

Nous venons de supposer que les deux globes avaient été mis d'abord en contact; considérons maintenant deux sphères chargées, dans des proportions quelconques, d'électricité de même nature ou de nature différente, et supposons qu'on les rapproche graduellement. S'il n'existe pas, entre l'espèce et les quantités d'électricité qu'elles possèdent, le rapport particulier qui existerait si elles avaient été mises en contact, la couche électrique dans les points les plus voisins devient bientôt de nature différente, si elle ne l'était déjà, et son épaisseur croît indéfiniment à mesure que leur distance diminue; la tension électrique, croissant proportionnellement au carré de cette épaisseur, finit par vaincre la résistance de l'air, et le fluide, s'échappant sous la forme d'étincelle, passe, avant le contact, d'une surface sur l'autre. Le fluide de nature différente, ainsi accumulé, avant l'explosion, dans les points les plus voisins, est à peu près d'égale intensité dans les deux sphères. Ainsi, quand les deux sphères ont été d'abord électrisées de manière différente, chacune d'elle conserve, dans le point le plus voisin de l'autre, la même espèce d'électricité qu'elle avait d'abord; mais quand elles ont été chargées d'électricité de même nature, il se fait une décomposition du fluide neutre dans la sphère qui contient moins d'électricité libre qu'elle n'en contiendrait si le contact avait eu lieu, et l'autre reste dans le même état. Toutes ces singulières alternatives ont été vérifiées par l'expérience, et aux distances indiquées par le calcul.

Lorsqu'un cylindre non isolé, terminé par une demi-sphère, est présenté perpendiculairement devant une sphère isolée et électrisée, à une distance assez grande pour qu'il n'y ait pas explosion, l'extrémité du cylindre la plus voisine de la sphère se charge d'une électricité contraire; cette électricité ne se dissipe pas, quoique le cylindre communique avec le sol, parce qu'elle est retenue et en partie dissimulée par l'attraction de l'électricité de la sphère. Coulomb a trouvé, par des observations multipliées, que l'épaisseur de la couche électrique était en raison inverse de la puissance 3/2 de la distance de l'extrémité du cylindre au centre de la sphère, en raison inverse du diamètre du cylindre et en raison directe de la quantité d'électricité de la sphère : ainsi, en désignant par a la distance de l'extrémité du cylindre à la surface de la sphère, par R le rayon de la sphère, par e l'épaisseur uniforme de la couche électrique qui la recouvre, par E l'épaisseur de la couche électrique à l'extrémité du cylindre, on a

$$E = \frac{mR^2e}{r(R+a)^{\frac{3}{2}}};$$

Digitized by Google

m est un coefficient constant qui doit être déterminé par l'expérience. Cette même formule serait encore applicable à un cylindre isolé très-long, attendu que l'on pourrait négliger l'action de l'électricité contraire, qui s'accumulerait sur l'extrémité opposée.

909. *Observations sur les hypothèses admises pour expliquer les phénomènes électriques.* L'explication que nous avons donnée des phénomènes électriques repose sur l'hypothèse de l'existence de deux fluides dont les molécules similaires se repoussent, et celles de natures différentes s'attirent. Tous les phénomènes s'expliquent dans cette hypothèse avec une extrême précision ; mais la réalité de l'hypothèse ne s'ensuit pas nécessairement : car pour qu'il en fût ainsi, il faudrait qu'il fût démontré qu'aucune autre hypothèse ne peut également satisfaire aux faits observés, ce qui est impossible. Nous verrons d'ailleurs des phénomènes dont on rend difficilement compte dans l'hypothèse des deux fluides : ainsi l'hypothèse admise ne doit être considérée que comme une hypothèse probable. Il en sera peut-être de l'électricité comme de la lumière. Jusqu'à une certaine époque la théorie de Newton satisfaisait complétement à tous les faits observés et paraissait être l'expression de la réalité ; mais de nouveaux phénomènes, dont l'explication était impossible dans la première théorie, firent douter de son exactitude, et conduisirent à une théorie nouvelle, qui, embrassant tous les phénomènes, est douée d'un très-haut degré de probabilité. Franklin a le premier imaginé d'expliquer les phénomènes électriques en n'admettant qu'un seul fluide : les corps à l'état naturel en renfermaient de certaines quantités qui ne manifestaient point leur présence ; mais, si ces quantités étaient augmentées ou diminuées, les corps agissaient comme s'ils étaient électrisés positivement ou négativement. Cette hypothèse n'a point été admise, parce que Æpinus et Cavendish, qui l'ont examinée, ont vu que, pour qu'elle rendît compte des principaux phénomènes électriques, il fallait admettre une attraction entre les corps et le fluide électrique, et une répulsion entre les molécules des corps solides, sensibles à toute distance.

§ II. *Appareils électriques.*

910. *Machines électriques.* La plupart des phénomènes que nous avons décrits n'exigeant que de faibles tensions électriques, le frottement d'un cylindre de verre ou de cire d'Espagne contre un morceau de drap tenu à la main était suffisant pour développer les petites quantités d'électricité nécessaires à leur manifestation ; mais pour un grand nombre d'expériences qui nous restent à décrire, il est nécessaire d'avoir de plus puissants appareils.

911. La machine électrique la plus ordinaire est composée (*fig.* 522, 522 *A*, 522 *B*) d'un plateau de verre circulaire, vertical, mobile sur son axe, et qui, dans sa rotation, frotte contre quatre coussins *m, n, p, q*, en crin, recouverts de peau, et fixés aux montants qui supportent l'axe du plateau ; deux cylindres creux en cuivre, *MN* et *M'N'*, montés sur des supports isolants, se terminent par des branches dont les extrémités, garnies de pointes ou de boules, embrassent le plateau sans le toucher. Lorsqu'on fait tourner la machine au moyen de la manivelle *ABC*, le frottement du verre contre les coussins développe deux espèces d'électricité : l'électricité positive se répand sur la surface du plateau, et l'électricité négative passe dans les coussins, et se dissipe dans le sol avec lequel ils communiquent. L'électricité positive du plateau décompose à distance l'électricité naturelle des conducteurs *MN* et *M'N'*; l'électricité négative, qui est attirée dans la partie du conducteur la plus voisine du plateau, s'écoule sur le verre, où elle forme du fluide naturel ; cet écoulement a lieu d'une

Digitized by Google

manière continue ou par intermittence, suivant que les extrémités des conducteurs sont garnies de pointes ou de boules : alors la partie opposée du conducteur se charge d'une quantité correspondante de fluide positif, dont la tension va continuellement en augmentant, jusqu'à ce que l'accroissement de tension soit égal à l'accroissement de perte par le contact de l'air, ou, si le développement est très-rapide, jusqu'à ce que la tension puisse vaincre la résistance de l'air.

912. Pour qu'une semblable machine fournisse le plus d'électricité possible dans les mêmes circonstances, il y a plusieurs conditions à remplir, qu'il est important de connaître. 1° Les coussins doivent être frottés *d'or mussif*, ou d'un alliage formé avec deux parties d'étain, quatre de zinc et sept de mercure : car l'expérience a fait reconnaître que le frottement du cuir nu sur le verre développait beaucoup moins d'électricité que quand il avait été recouvert des substances dont nous venons de parler. 2° Les coussins doivent communiquer avec le sol : car c'est encore un fait d'expérience que deux corps isolés donnent beaucoup moins d'électricité par leur frottement que quand l'un d'eux communique avec le sol. La raison en est d'ailleurs facile à saisir. En effet, soient A et B deux corps isolés qui, par leur frottement, mettent en liberté des quantités de fluides positif et négatif, que je représenterai par $+a$ et $-a$ (j'emploie la même lettre avec des signes différents pour indiquer que ces quantités peuvent se neutraliser mutuellement) : ces électricités tendent à se combiner, et cette tendance augmentant à mesure que le frottement en développe une plus grande quantité, il en résulte que l'influence du frottement, pour décomposer une nouvelle quantité de fluide naturel, ira en décroissant, et deviendra nulle lorsque l'attraction des fluides libres $+a$ et $-a$ sera égale à la force que produit le frottement pour décomposer du fluide naturel ; mais si l'un des deux fluides peut se dégager, l'autre, en agissant par influence, concourra avec le frottement pour opérer de nouvelles décompositions du fluide naturel. 3° Il doit y avoir autant de branches garnies de pointes qu'il y a de paires de coussins, afin que la portion du plateau qui se présente au frottoir soit toujours à l'état naturel. 4° Le conducteur, excepté l'extrémité des branches qui enveloppent le plateau, ne doit renfermer aucune pointe, ni aucun corps aigu : car la tension y deviendrait beaucoup plus grande que dans le reste du conducteur, et le fluide s'écoulerait continuellement dans l'air par leurs extrémités. 5° Le conducteur doit être supporté par des corps très-isolants, tels que des cylindres de verre enduits de gomme laque. 6° Pour éviter la déperdition d'électricité du plateau par l'air, dans le trajet des frottoirs aux pointes du conducteur, on fixe contre les montants qui en supportent l'axe des quarts de cercle en taffetas gommé ; ou bien, on incline les tiges du conducteur, de manière que les pointes soient voisines des frottoirs. Lorsque les conducteurs sont garnis de pointes, ils peuvent se charger sous une plus petite tension ; mais ils ne restent chargés qu'autant que la machine est en mouvement. Dans les premières machines électriques, on employait des globes ou des cylindres de verre, que l'on faisait tourner sur leur axe. C'est Ramsden qui, le premier, leur a substitué des plateaux de glace.

913. Pour obtenir de fortes étincelles, qui s'élancent à de grandes distances sur les corps environnants, on emploie souvent des conducteurs isolés que l'on met en communication avec ceux de la machine, et qu'on désigne sous le nom de *conducteurs secondaires*. Il faut évidemment donner à ces conducteurs des formes telles qu'ils se recouvrent d'une couche électrique la plus épaisse possible, comparativement à celle du conducteur de la machine. Les cylindres d'une grande longueur et d'un petit diamètre sont éminemment propres à remplir cette condition. Volta employait un système de 12 cylindres de 6 lignes de diamètre et de 8 pieds de longueur, communiquant ensemble, mais assez éloignés pour qu'ils ne se nuisent point par leur influence

Digitized by Google

mutuelle. Ce système, qui renferme 12 pieds carrés de surface, lance de très-grandes étincelles, et produit sur les organes des sensations très-énergiques.

Coulomb a trouvé qu'en mettant en communication des cylindres très-longs, et dont les diamètres étaient représentés par r et r', les épaisseurs e et e' des couches électriques dont ils se chargeaient étaient représentées par

$$\frac{e'}{e} = 0,18784. \frac{r}{r' \frac{r}{10}}$$

la ligne étant prise pour unité de longueur.

914. La machine que nous venons de décrire ne donne que de l'électricité positive; si on voulait avoir de l'électricité négative, il faudrait former les montants *mp* et *nq* avec des glaces, et faire communiquer les frottoirs avec un autre conducteur isolé. On obtiendrait à la fois les deux électricités sur les deux conducteurs; mais la tension serait beaucoup plus grande en faisant communiquer un des conducteurs avec le sol.

915. Van-Marum, de Harlem, a imaginé une construction de machine qui donne à volonté de l'électricité positive ou de l'électricité négative. Cette machine est représentée fig. 523 et 523 *A*. Pour obtenir de l'électricité positive sur le conducteur *M* (*fig.* 523 *A*), les deux branches *A* et *B* sont disposées verticalement, et les branches *C* et *D* touchent les frottoirs pour établir leur communication avec le sol. Lorsqu'on veut avoir de l'électricité négative (*fig.* 523), on place horizontalement les branches *A* et *B*, de manière qu'elles communiquent avec les frottoirs, et les branches *CD* verticalement, pour qu'elles déchargent le plateau.

916. On pourrait facilement faire des machines à électricité négative, en faisant frotter du taffetas ciré sur de la peau de chat. La figure 524 représente la disposition la plus simple de cet appareil.

917. Mais, parmi les différentes espèces de machines électriques, celle qui est la plus simple et la plus commode pour obtenir à volonté l'une ou l'autre espèce d'électricité est celle qui est due à Nairne. Elle est représentée fig. 525, 525 *A*. Cette machine se compose d'un grand cylindre de verre rétréci à ses deux extrémités, et garni de deux prolongements métalliques placés dans l'axe du cylindre qui tournent dans deux coussinets isolés ; un d'eux est garni d'une manivelle; de chaque côté du cylindre de verre sont placés deux cylindres de cuivre isolés, dont l'un est armé de pointes, l'autre d'un frottoir. On conçoit facilement que, par cette disposition, quand on mettra le premier conducteur en contact avec le sol, l'autre se chargera d'électricité négative, et que, quand le second sera lui-même en communication avec le sol, le premier prendra l'électricité positive. Quel que soit le système de machine qu'on emploie, la quantité d'électricité est proportionnelle à la vitesse, et indépendante de la pression des frottoirs.

918. On fait ordinairement avec les machines électriques quelques expériences, dont les effets s'expliquent facilement au moyen de la théorie que nous avons exposée.

919. Lorsque l'on place à l'extrémité du conducteur un plateau métallique *AB* (*fig.* 526), communiquant avec lui, et au-dessous un autre, *CD*, en communication avec le sol; si l'on met entre eux un corps léger *mn* lesté en *n*, la machine étant en mouvement, le corps *mn* sera attiré vers *AB*, et, aussitôt qu'il l'aura touché, il en sera repoussé comme possédant la même espèce d'électricité. En retombant sur le plateau *CD*, il reviendra à l'état naturel, et sera de nouveau attiré et repoussé, tant que la machine sera en mouvement.

Digitized by Google

On fait aussi cette expérience d'une autre manière. *ABCD* (*fig.* 527) est un cylindre de verre, fermé inférieurement par un plateau métallique qui communique avec le sol, et supérieurement par un autre disque métallique, communiquant avec le conducteur d'une machine électrique. On met dans le cylindre des boules de sureau; elles s'élèvent et retombent successivement.

AB (*fig.* 528) est une tige métallique, communiquant avec le conducteur, et supportant trois timbres *C,D,E,* le premier et le troisième par des chaînes métalliques, et celui du milieu par un cordon de soie; ce dernier communique avec le sol par la chaîne *g*; entre les timbres extrêmes et celui du milieu sont suspendues, par des cordons de soie, deux petites boules de cuivre *a* et *b* : lorsqu'on fait tourner la machine, la boule *a* se meut entre les timbres *C* et *D,* et la boule *b* entre les timbres *D* et *E,* comme le corps *mn* de l'expérience précédente entre les plateaux *AB* et *CD*. Cet appareil porte le nom de *Carillon électrique*.

920. Lorsqu'on place un corps conducteur, terminé par une pointe aiguë, sur le conducteur d'une machine électrique, il se charge très-peu; le même effet se manifeste quand on place dans le voisinage du conducteur un corps conducteur communiquant avec le sol, et terminé par une pointe aiguë. L'explication de ces effets se déduit facilement de ce que nous avons dit précédemment. On peut rendre manifeste l'écoulement de l'électricité, dans le dernier cas, au moyen de l'appareil à timbre *fig.* 529. Les tiges ombrées sont celles qui sont construites en matière conductrice.

921. Si on dispose sur le conducteur d'une machine électrique une tige *ab* (*fig.* 530), sur laquelle repose une aiguille métallique terminée par deux pointes inclinées en sens contraire sur sa direction, par le mouvement du plateau de la machine l'aiguille tourne en sens contraire de la direction des pointes. Ce phénomène avait été assimilé, comme nous l'avons déjà dit, aux effets de réaction produits par l'écoulement des liquides et des gaz, en considérant la couche d'air qui environne un corps électrisé comme un vase qui retenait le fluide, mais dont les parois n'étaient susceptibles que d'une résistance limitée : alors, si, en un point quelconque de la surface, la tension électrique l'emportait sur cette résistance, le vase était percé, le fluide s'écoulait, et la pression sur le point opposé du vase lui donnait un mouvement en sens contraire de l'écoulement. Cette explication était cependant difficile à admettre, car, l'action étant égale à la réaction, il fallait supposer à l'électricité une masse finie ou une vitesse infiniment grande. Mais M. Aimé a fait voir que cette explication était inexacte : une aiguille contournée en *S,* enduite de vernis dans toute son étendue, excepté à l'extrémité des pointes, et soutenue horizontalement dans une cloche par un fil métallique extrêmement fin et recouvert de vernis, ne tourne pas lorsque l'on a fait le vide dans la cloche, et que le fil de suspension communique avec une machine électrique en activité, quoique alors l'électricité s'écoule rapidement par les pointes; ce dont il est facile de s'assurer en faisant l'expérience dans l'obscurité. Il est très-probable d'après cela que le mouvement dont il s'agit provient de la force répulsive exercée sur l'aiguille par l'air que le courant électrise. Cette explication est encore appuyée par un autre fait, également observé par M. Aimé : le tourniquet électrique fonctionne lorsqu'il est plongé dans un liquide mauvais conducteur, tel que l'huile, et reste immobile quand il est plongé dans l'eau.

Lorsqu'un liquide s'échappe d'un vase par des orifices assez capillaires pour que l'écoulement ait lieu par intermittence et goutte à goutte, en électrisant le vase, l'écoulement devient continu; mais, d'après Carmoy, la dépense n'est pas augmentée. Ce dernier résultat paraît assez singulier, attendu que le premier s'explique naturellement par une diminution de pression de l'air à l'extrémité des tubes d'écoulement; peut-être la différence de dépense était trop petite pour être appréciable par les

Digitized by Google

moyens qui ont été employés pour la mesurer. Il paraît aussi qu'un liquide électrisé s'évapore plus rapidement qu'un liquide qui ne l'est pas.

922. *Électrophore.* Cet appareil, imaginé par Wilk, est composé (*fig.* 531) d'un gâteau de résine à surface bien plane, renfermé dans une enveloppe métallique *AB*, et d'un disque métallique *CD* d'un diamètre un peu plus petit, armé d'un manche isolant *EF*. Pour se servir de cet appareil, on frotte le gâteau de résine avec une peau de chat, et on place dessus le disque *CD* : l'électricité négative, dont la résine a été chargée par le frottement, décompose le fluide naturel du plateau métallique ; l'électricité positive se répand sur la face inférieure et l'électricité négative sur la face supérieure ; le fluide positif du plateau ne se combine pas avec le fluide négatif du gâteau, à cause de la difficulté que ce fluide éprouve à se mouvoir dans la résine. Si alors on soulève le plateau, ses deux électricites, qui ont été séparées par l'influence de celle dont la résine est chargée, se combineront, et tout rentrera dans l'état initial ; mais si avant de soulever le plateau on touche sa surface supérieure avec le doigt, on augmentera la quantité d'électricité décomposée, en permettant à l'électricité négative de s'échapper, et après sa séparation du gâteau, le disque possédera toute l'électricité positive libre qui était répandue sur la surface inférieure ; et comme le gâteau ne perd que très-lentement son électricité, l'expérience pourra être répétée un grand nombre de fois ; à la fin cependant l'électricité du gâteau finira par disparaître.

923. L'électricité de la résine agit sur son enveloppe métallique de la même manière que sur le plateau métallique ; mais, comme cette enveloppe communique avec le sol, elle se charge seulement d'électricité positive ; c'est ce que l'on peut mettre en évidence de la manière suivante : si on fait communiquer le plateau avec la petite boule *a* (*fig.* 532), et l'enveloppe du gâteau de résine avec la boule *b*, un pendule isolé *c* oscillera continuellement entre les deux boules. La raison en est évidente : la boule *a*, étant en communication avec la partie supérieure du plateau, partagera son électricité négative, et la boule *b*, étant en communication avec l'enveloppe du gâteau, partagera son électricité positive. Alors la boule du pendule, se trouvant à l'état naturel, se rapprochera de la boule qui aura la plus grande tension, en la touchant elle partagera son électricité, elle sera alors repoussée ; les mêmes phénomènes se reproduiront sur l'autre boule, et ces alternatives dureront tant que le gâteau conservera de l'électricité.

On pourrait aussi charger la résine d'électricité positive, en mettant le gâteau en contact avec le conducteur d'une machine électrique : les mêmes phénomènes auraient lieu.

Des plateaux de 4 à 5 pouces de diamètre donnent, à l'approche du doigt ou d'un corps conducteur, des étincelles très-visibles en plein jour. Ces appareils conservent souvent l'électricité pendant plusieurs mois, tant la résine laisse difficilement dégager l'électricité dont elle est chargée ; ils sont souvent employés dans les laboratoires de chimie pour les expériences eudiométriques.

924. Pour mettre en évidence l'espèce d'adhérence qui existe entre la résine et les deux fluides électriques, on fait une expérience curieuse, que nous allons rapporter. Sur la surface d'un plateau de résine on trace, avec un corps conducteur chargé d'électricité, des caractères quelconques ; l'électricité reste sur ces lignes : car, si on jette sur le plateau une poudre d'un corps non conducteur, et qu'on l'incline, la poudre reste fixée au plateau sur les lignes parcourues par le corps électrisé. On rend cette expérience encore plus piquante en traçant des caractères avec les deux espèces d'électricité, et injectant sur la surface, au moyen d'un petit soufflet, un mélange de soufre et de minium ; le soufre se fixe sur les traits chargés d'électricité positive, et le minium sur les traits chargés d'électricité négative ; par conséquent, les premiers

Digitized by Google

caractères sont jaunes et les derniers sont rouges. Cette séparation provient de ce que, dans la trituration du soufre et du minium, le premier prend l'électricité négative, et le second l'électricité positive.

925. On peut disposer l'électrophore de manière à obtenir des étincelles sans être obligé de toucher le plateau ; il suffit pour cela de coller contre le gâteau *fig.* 533 une petite bande d'étain laminé qui communique avec le sol, ou seulement avec l'enveloppe du gâteau ; il est évident que, par cette disposition, on obtiendra le même effet que si on touchait la face inférieure du plateau : l'électricité qu'on obtient alors, après avoir soulevé le plateau, est encore positive.

926. On a employé des électrophores dans les briquets à gaz hydrogène, pour enflammer le gaz. La fig. 534 en représente la disposition la plus simple ; le gaz hydrogène est fourni par un appareil semblable à celui de M. Gay-Lussac (367) ; mais en même temps qu'en tournant le robinet on produit un écoulement de gaz hydrogène, le même mouvement produit, entre deux pointes placées de chaque côté de l'orifice, une étincelle qui, en traversant le gaz, produit son inflammation. L'électricité est fournie par un électrophore renfermé dans la boîte *MN*. Le levier *cd*, fixé au robinet, soulève le plateau de l'électrophore, l'étincelle est reçue par une petite boule placée à l'extrémité de la tige métallique isolée *ef*, et elle passe de la pointe *m* à la pointe *n*, qui communique avec le sol. Ces briquets sont beaucoup plus compliqués et d'un service bien moins assuré que ceux à mousse de platine que nous avons décrits (367) ; aussi ils ne sont en usage que dans les cabinets de physique.

927. *Condensateurs.* Soient *A* et *B* (*fig.* 535) deux plateaux métalliques communiquant, le premier avec le conducteur d'une machine électrique, le second avec le sol, et séparés l'un de l'autre par un disque de verre d'un plus grand diamètre ; supposons que la machine produise de l'électricité positive : le plateau *A* prendra d'abord une certaine quantité d'électricité positive ; cette électricité du plateau *A* agira à distance et à travers le disque de verre sur le plateau *B*, décomposera son électricité naturelle, attirera contre le disque l'électricité négative, et refoulera dans le sol l'électricité positive. Représentons par *V* la quantité d'électricité du premier plateau, et par *R* celle du second : *V* sera nécessairement plus grand que *R*, car cette dernière, étant neutralisée par la première à la distance de l'épaisseur du verre, sera plus petite que celle qui le serait au contact ; réciproquement, *R*, en agissant sur *V*, en neutralise une partie, mais qui sera plus petite que celle qu'il neutraliserait au contact, et par conséquent plus petite que *R*. Ainsi, la quantité totale d'électricité renfermée dans le plateau inférieur sera dissimulée, et une partie de celle du premier plateau sera dissimulée par l'électricité du plateau inférieur. Par conséquent, le premier plateau pourra prendre une nouvelle charge d'électricité, dont une partie sera dissimulée par la réaction de celle qu'elle développera dans *B*. Alors, en supposant que la machine fournisse toujours de l'électricité, la charge du plateau *A* deviendra stationnaire lorsque la portion d'électricité libre deviendra égale à celle qu'il acquerrait s'il communiquait avec le conducteur sans faire partie de l'appareil. Si le plateau inférieur ne communiquait pas avec le sol, l'appareil se chargerait peu, parce que le fluide positif du plateau inférieur ne pourrait pas se dégager et exercerait une action répulsive sur la charge du plateau supérieur.

Toutes ces conséquences théoriques sont parfaitement confirmées par l'expérience. En effet, si, après avoir chargé un condensateur au moyen d'une machine, on isole les deux plateaux en enlevant le conducteur *ab* et la chaîne *cd*, et qu'on les sépare, on les trouvera chargés d'électricités différentes ; et si on met en communication les deux plateaux au moyen de l'appareil *fig.* 536, que l'on nomme *excitateur* (c'est un conducteur dont les extrémités peuvent être rapprochées au moyen d'une charnière,

Digitized by Google

et que l'on tient par des manches isolants), en appliquant un des boutons contre un des plateaux, et approchant l'autre bouton de l'autre plateau, il se fait à une petite distance une violente explosion, et si on met les plateaux en contact par les mains ou toute autre partie du corps, on éprouve une vive commotion qui se fait principalement sentir dans les articulations. Cette commotion se fait même sentir à travers une chaîne composée d'un nombre quelconque de personnes, pourvu que ses extrémités soient en contact avec les deux plateaux.

928. Lorsqu'un condensateur a été ainsi déchargé, par de nouveaux contacts successifs, au moyen de l'excitateur, on obtient encore des étincelles, parce qu'une partie des électricités accumulées contre les faces opposées de la lame de verre pénètre dans cette lame, et ne s'en dégage que difficilement; c'est ce que l'on peut facilement constater par l'expérience suivante. Après avoir chargé un condensateur à lame de verre, on le place sur un isoloir; on enlève le plateau supérieur, il donne une étincelle, mais très-petite; ensuite on enlève la lame de verre et on touche le plateau inférieur, il ne donne également qu'une faible étincelle; on remet alors la lame de verre ainsi que le plateau supérieur, et le condensateur se trouve chargé presque aussi fortement qu'il l'était d'abord. Ainsi les charges des deux plateaux étaient restées presque en totalité sur les faces opposées de la lame de verre.

929. Lorsqu'un condensateur chargé d'électricité est isolé, on peut le décharger en touchant alternativement les deux plateaux. En effet, le plateau A, renfermant de l'électricité libre, la cédera entièrement si on le touche avec un corps communiquant avec le réservoir commun; mais alors toute l'électricité de B ne sera plus dissimulée : par conséquent B donnera aussi à son tour une portion d'électricité par le contact; par la même raison, A, par la diminution d'électricité de B, acquerra une portion nouvelle d'électricité libre, et ainsi de suite. Ainsi, par le contact alternatif de chaque plateau, on développe de l'électricité libre dans l'autre, et on parvient à décharger complétement l'appareil, ce qui est parfaitement d'accord avec l'expérience.

Représentons par V_1, V_2, V_3, etc., V_n, les quantités d'électricité qui se trouvent successivement sur le plateau supérieur; par $R_1, R_2, \ldots, R_n$, les quantités d'électricité qui se trouvent sur le plateau inférieur, et par μ la fraction qui représente la portion d'électricité neutralisée dans un plateau par celle qui se trouve dans l'autre : nous aurons la suite d'équations

$$\left.\begin{array}{l} R_1 = \mu V_1 \\ V_2 = \mu R_1 \\ R_2 = \mu V_2 \\ V_3 = \mu R_2 \\ \ldots\ldots \\ V_n = \mu R_{n-1} \end{array}\right\} \text{On déduit de ces équations} \left\{\begin{array}{ll} V_2 = \mu^2 V_1 & R_2 = \mu^2 R_1 \\ V_3 = \mu^4 V_1 & R_3 = \mu^4 R_1 \\ V_4 = \mu^6 V_1 & R_4 = \mu^6 V_1 \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots \\ V_n = \mu^{2(n-1)} V_1 & R_n = \mu^{2(n-1)} R_1 \end{array}\right.$$

Si dans la valeur de R_n, on remplace R_1 par sa valeur μV_1, il vient $R_n = \mu^{2n-1} V_1$: ainsi les quantités d'électricité qui restent dans les plateaux supérieur et inférieur forment les progressions décroissantes

$$V_1,\ \mu^2 V_1,\ \mu^4 V_1,\ \mu^6 V_1,\ \mu^8 V_1, \text{ etc.}$$
$$\mu V_1,\ \mu^3 V_1,\ \mu^5 V_1,\ \mu^7 V_1,\ \mu^9 V_1, \text{ etc.}$$

Les pertes que les plateaux éprouvent successivement forment également des progressions géométriques : en effet, les pertes du plateau supérieur sont

$$V_1 - V_2 = V_1 (1 - \mu^2),\quad V_2 - V_3 = V_1 (1 - \mu^2)\, \mu^2,$$
$$V_3 - V_4 = V_1 (1 - \mu^2)\, \mu^4, \text{ etc.}$$

Digitized by Google

Celles du plateau inférieur sont

$$R_1 - R_2 = V_1 (1 - \mu^2) \mu, \quad R_2 - R_3 = V_1 (1 - \mu^2) \mu^2,$$
$$R_3 - R_4 = V_1 (1 - \mu^2) \mu^3, \text{ etc.}$$

On peut facilement vérifier l'exactitude de ces formules : car la somme totale des pertes du premier plateau, en supposant le nombre des contacts infini, doit être égale à V_1, et celle des pertes du plateau inférieur doit être égale à R_1 :

La première somme est $V_1 (1 - \mu^2) (1 + \mu^2 + \mu^4 + \mu^6 + \text{etc.})$,
la seconde est $V_1 (1 - \mu^2) (\mu + \mu^3 + \mu^5 + \mu^7 + \text{etc.})$;

Mais $1 + \mu^2 + \mu^4 \text{ etc.} = \frac{1}{1 - \mu^2}$: ainsi la somme des pertes du premier plateau est

$$\frac{V_1 (1 - \mu^2)}{1 - \mu^2} = V_1,$$

et celle du second est

$$V_1 (1 - \mu^2) \frac{\mu}{1 - \mu^2} = V_1 \mu = R_1.$$

930. On peut rendre évidente la présence de l'électricité mise successivement en liberté sur les deux plateaux, au moyen de l'appareil *fig.* 537; chaque plateau est garni d'une tige métallique, armée d'un petit pendule, dont le mouvement décèle la présence de l'électricité libre dans le plateau avec lequel il communique.

931. La quantité d'électricité qui peut s'accumuler dans un condensateur est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la surface des plateaux, et en raison inverse de l'épaisseur de la lame isolante. Il semblerait, d'après cela, qu'on pourrait augmenter indéfiniment la faculté condensante d'un appareil, en diminuant convenablement l'épaisseur de la plaque isolante; mais il n'en est pas ainsi : car, si son épaisseur est très-petite relativement à la tension des électricités qui la pressent, les actions électriques la brisent.

932. On peut se servir, pour corps isolant, de verre, de résine, de taffetas gommé, et même d'une couche de vernis, dont on enduit les faces de contact des deux plateaux. Les condensateurs de taffetas gommé ont le grand inconvénient de n'être pas comparables, parce que, par la pression, le taffetas gommé développe de l'électricité. Les condensateurs à vernis ne peuvent être employés que pour accumuler de petites doses d'électricité, qui, par leur réunion, ne produisent que de faibles tensions. On pourrait aussi employer une couche d'air, en séparant les deux plateaux par un petit intervalle : la limite de la saturation aurait évidemment lieu lorsque l'attraction des deux électricités pourrait vaincre la résistance de l'air; la charge de l'appareil serait beaucoup plus petite que dans les autres cas. Quelle que soit d'ailleurs la nature du corps isolant employé, il faut, pour éviter la décharge latérale, que le disque isolant ait un plus grand diamètre que les plateaux.

933. La force condensante d'un condensateur est représentée par le rapport entre la quantité totale d'électricité que possède le plateau supérieur et celle qui s'y trouve libre, et on peut facilement trouver ce rapport par l'expérience.

En désignant par A la quantité d'électricité introduite dans le plateau supérieur, elle neutralisera à distance, dans le plateau inférieur, une quantité $-B$ d'électricité de nom contraire, et cette dernière, réagissant sur la charge du plateau supérieur, dissimulera dans ce dernier une quantité A' d'électricité : ainsi, en désignant par E la quantité d'électricité libre du plateau supérieur, on aura

$$E = A - A';$$

Digitized by Google

mais remarquons que le rapport de A à B doit être le même que celui de B à A' : par conséquent, en le désignant par m, nous aurons

$$B = -mA \text{ et } A' = -mB, \text{ d'où } A' = m^2 A \text{ et } E = (1 - m^2)A$$

ainsi
$$\frac{A}{E} = \frac{1}{1 - m^2}.$$

Ce dernier rapport est la mesure de la force condensante de l'appareil.

On pourrait déterminer la valeur de m en chargeant le condensateur d'une quantité quelconque d'électricité, l'isolant, séparant les plateaux et les touchant successivement par un même plan d'épreuve, que l'on appliquerait sur des points semblablement situés sur chacun d'eux : les racines carrées des réactions du plan d'épreuve, que l'on déterminerait au moyen de la balance de Coulomb, seraient proportionnelles aux quantités totales d'électricité qui se trouvaient dans chacun des plateaux lorsqu'ils étaient appliqués sur la lame isolante, car, quand on les sépare, la majeure partie de l'électricité reste adhérente au verre ; mais celle qui se trouve sur chacun d'eux doit être proportionnelle à la quantité totale.

Mais on peut déterminer la quantité m sans démonter le condensateur ; pour cela il faut l'isoler, mettre le disque inférieur en contact avec le sol, toucher le disque supérieur avec le plan d'épreuve, mettre le disque supérieur en contact avec le sol, et déterminer la tension du disque inférieur en le touchant avec le même plan d'épreuve : le rapport des racines carrées des deux tensions est égal à la quantité m. En effet, nous avons trouvé

$$\frac{A}{E} = \frac{1}{1 - m^2}$$

quand la tension existe sur le plateau supérieur ; on trouverait de même

$$\frac{B}{E'} = \frac{1}{1 - m^2}$$

quand on a mis le plateau supérieur en contact avec le sol.

Ainsi
$$\frac{E'}{E} = \frac{B}{A}; \text{ mais } B = -mA : \text{ donc } \frac{E'}{E} = m.$$

934. Il est infiniment probable que l'électricité qui est retenue si fortement dans les corps non conducteurs l'est, en partie du moins, par une action analogue à celle qui a lieu dans les condensateurs : l'électricité libre doit décomposer le fluide naturel intérieur, et la difficulté que le fluide éprouve à se mouvoir doit les maintenir comme dans un condensateur.

935. L'appareil que l'on désigne sous le nom de *bouteille de Leyde* (*fig.* 538) est composé d'un flacon rempli d'or en feuille, d'étain laminé, ou de toute autre matière conductrice, fermé par un bouchon recouvert de vernis à la gomme laque ou de cire d'Espagne, à travers lequel passe une tige terminée inférieurement par une pointe, et supérieurement par un bouton ; la surface extérieure jusqu'à la hauteur mn est recouverte d'une feuille d'étain. Le métal enveloppant porte le nom d'*armure extérieure*, et celui qui est dans le flacon ainsi que la tige mn sont désignés sous le nom d'*armure intérieure*. Il est évident que cet appareil est de même nature que les condensateurs, car il est formé de deux corps conducteurs séparés par une lame isolante. Par conséquent, tout ce que nous avons dit des condensateurs est applicable aux bouteilles de Leyde. Ainsi, pour les charger il faut qu'une des deux armures soit en contact avec le sol ; on peut les décharger en mettant les

Digitized by Google

deux armures en contact, ou en les touchant alternativement, etc. Ces appareils, qui furent découverts en 1746, par Musschenbroeck et Cunéus, sont principalement employés pour produire de violentes commotions ou des combustions; nous les examinerons plus tard sous ce rapport. Ils sont aussi très-commodes pour se procurer à volonté les deux électricités : pour cela on isole une bouteille de Leyde chargée, et en touchant alternativement les deux armures, on obtient successivement les deux espèces de fluides électriques.

Dans la bouteille de Leyde, comme dans le condensateur ordinaire, l'électricité accumulée sur les deux armures adhère au verre, de sorte que, si on pouvait enlever simultanément les deux armures, chacune d'elles ne serait chargée que d'une très-petite quantité d'électricité. On peut facilement faire cette expérience au moyen de l'appareil fig. 539. Cette bouteille de Leyde se compose de trois vases cylindriques, qui entrent les uns dans les autres; les deux extrêmes sont en métal et forment les deux armures, celui qui est intermédiaire est en verre : si après avoir chargé la bouteille on la place sur un isoloir, et si on enlève les deux vases intérieurs avec un corps isolant, on trouve que les deux armures n'ont qu'une très-faible tension, et que la bouteille reprend sa charge primitive quand on remet les vases en place.

936. La charge d'une bouteille de Leyde est proportionnelle à l'étendue de la surface des deux armures et à la tension de l'armure qui a été mise en communication avec la source d'électricité : la charge d'un même appareil est alors proportionnelle à sa tension. On apprécie cette tension par la distance à laquelle se fait l'explosion, car cette distance diminue à mesure que la tension est plus petite. On se sert pour cela de l'appareil *fig.* 540. *AB* est une tige mobile dans l'anneau *C*, et qui communique avec l'armure extérieure : on approche lentement le bouton *A* du bouton *M*, et après l'explosion on mesure la distance des deux boules.

937. L'appareil 541 est un carillon à bouteille de Leyde; on en concevra facilement l'effet d'après ce que nous avons dit précédemment. Dans l'appareil 542, qui produit le même effet, la bouteille de Leyde se charge par sa pointe, en la plaçant dans le voisinage du conducteur d'une machine électrique.

938. Lorsqu'une bouteille de Leyde chargée est abandonnée à l'action de l'air, l'armure extérieure communiquant avec le sol, la tension de l'autre va continuellement en diminuant, et la bouteille finit par se décharger complétement; mais si on isole la bouteille, l'armure par laquelle elle a été chargée, étant la seule qui possède de l'électricité libre, perd d'abord seule de l'électricité; mais aussitôt que la tension de cette armure a commencé à diminuer, l'électricité de l'autre ne se trouve plus dissimulée en totalité : il s'y développe donc de l'électricité libre, et elle commence à son tour à perdre par le contact de l'air. Il est facile de voir que l'armure dont l'électricité était totalement dissimulée doit acquérir une tension croissante, jusqu'à ce qu'elle ait atteint celle de l'autre armure, et qu'alors ces deux tensions doivent décroître ensemble, jusqu'à ce que la totalité de l'électricité se soit dissipée. Ce fait est parfaitement confirmé par l'expérience, comme on peut le reconnaître à l'aide de l'appareil suivant.

MN (*fig.* 543) est une lame de verre verticale, garnie sur chaque face d'une lame d'étain et d'un petit pendule. Si, après avoir chargé cet appareil en mettant une de ses faces en contact avec le sol, et l'autre avec le conducteur d'une machine électrique, on abandonne l'appareil à lui-même, la communication avec le sol restant établie, le petit pendule qui se trouve placé sur l'armure possédant de l'électricité libre s'abaisse graduellement, et l'autre reste immobile. Mais, si la communication avec le sol a été supprimée, le petit pendule de l'armure qui ne renfermait que de l'électricité dissimulée s'élève graduellement à mesure que l'autre s'abaisse; ils arrivent

Digitized by Google

bientôt à un écart à peu près égal, et qui est environ la moitié de l'écart initial du premier : alors tous deux descendent, mais très-lentement.

939. *Piles électriques.* Lorsque l'on forme une chaîne avec plusieurs bouteilles de Leyde (*fig.* 544) dont l'armure extérieure de chacune communique avec l'armure intérieure de la suivante, et si on fait communiquer l'armure intérieure de la première avec le conducteur d'une machine électrique donnant de l'électricité positive, et l'armure extérieure de la dernière avec le sol, toutes se chargeront positivement en dedans, et négativement en dehors. En effet, la charge positive intérieure de la première refoulera dans la seconde le fluide positif, tandis qu'elle attirera contre la surface du verre l'électricité négative, la seconde bouteille agira de même sur la troisième, et ainsi de suite. Il est évident que les charges iront en diminuant à partir de la première.

En désignant par V_1, V_2, V_3, etc., V_n, les quantités d'électricité répandues sur les armures extérieures ; par R_1, R_2, R_3, etc., R_n, les quantités d'électricité renfermées sur les armures intérieures, on aura les équations

$$\begin{array}{ll} R_1 + V_2 = 0 & R_1 + \mu V_1 = 0 \\ R_2 + V_3 = 0 & R_2 + \mu V_2 = 0 \\ R_3 + V_4 = 0 & R_3 + \mu V_3 = 0 \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot & \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \\ R_{n-1} + V_n = 0 & R_n + \mu V_n = 0 \end{array}$$

En combinant ces équations, on trouve

$$\begin{array}{ll} R_2 = \mu R_1 & V_2 = \mu V_1 \\ R_3 = \mu R_2 & V_3 = \mu V_2 \\ R_4 = \mu R_3 & V_4 = \mu V_3 \\ \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot & \cdot\ \cdot\ \cdot\ \cdot \\ R_n = \mu R_{n-1} & V_n = \mu V_{n-1} \end{array}$$

En multipliant ces équations, il vient

$$R_n = \mu^{n-1} R_1 \qquad \text{et} \qquad V_n = \mu^{n-1} V_1$$

Au lieu de bouteilles de Leyde, on pourrait employer des lames de verre revêtues de lames d'étain sur les deux surfaces, et disposées comme l'indique la fig. 545. Si l'on superpose une suite de condensateurs (*fig.* 546), il est évident que l'on obtiendra un appareil absolument semblable. Ces derniers appareils portent le nom de *piles électriques.*

Si on décharge l'appareil, en mettant en communication l'armure supérieure de la première plaque avec l'armure inférieure de la dernière, on ne recevra que la commotion résultant de la charge des deux armures extrêmes, parce que toutes les autres électricités libres se neutraliseront entre elles.

Si, après avoir chargé un de ces appareils en le mettant en contact avec une machine donnant de l'électricité positive, on l'isole, et si on détermine à l'aide d'un petit plan d'épreuve la nature et l'intensité de l'électricité libre sur les armures, on trouve, comme cela devait être, que l'appareil ne renferme que de l'électricité positive libre, dont la tension va en décroissant de la première armure à l'avant-dernière. Mais si on touche la première armure, l'appareil se charge dans toute son étendue d'électricité négative : car l'appareil se trouve dans le même état que si la dernière armure avait été en communication avec une source d'électricité négative, et si la

Digitized by Google

première avait été mise en contact avec le sol ; mais si l'appareil reste longtemps exposé à l'air, la déperdition de l'électricité par le contact de l'air finit par établir des tensions sur toutes les armures, qui, au bout d'un certain temps, se trouvent disposées comme il suit : les tensions sont de nature différente dans les deux moitiés de l'appareil ; elles sont égales sur deux armures également éloignées des extrémités, et croissent du centre vers les extrémités, de sorte que la première et la dernière ont des tensions égales, mais de nature contraire. Si on divise la série en plusieurs parties, l'électricité dans chacune d'elles finira par se répartir de la même manière que dans la série totale. Ces faits, qui sont le résultat du calcul, sont parfaitement confirmés par l'expérience.

Nous verrons bientôt des phénomènes qui paraissent avoir beaucoup d'analogie avec ceux des piles électriques.

940. *Électroscopes.* Ces instruments ont pour objet de découvrir dans les corps de très-petites quantités d'électricité ; tous sont fondés sur les attractions et les répulsions qui se manifestent dans les corps légers par les fluides électriques qu'ils renferment. Les appareils fig. 506, 508, 510 et 511, sont les électroscopes les plus simples ; mais pour soustraire les mouvements à l'influence de l'air, on dispose ordinairement l'appareil dans un petit flacon (*fig.* 547 et 548). Les corps qui doivent s'écarter par l'influence électrique sont ou des brins de paille, ou de minces fils métalliques, dont les extrémités sont garnies de boules de moelle de sureau, ou de lames d'or très-minces.

Il est indispensable que, dans les électroscopes, les pailles, les boules ou les lames d'or, dans leur plus grand écart, ne viennent point toucher le verre : car elles pourraient y rester adhérentes, et elles communiqueraient au verre une électricité qui se dissiperait difficilement, et troublerait longtemps les résultats. Pour éviter cet inconvénient, on emploie les dispositions représentées par les fig. 549 et 550. *a* et *b* (*fig.* 549) sont des boules métalliques communiquant avec le sol par les tiges qui les supportent, et contre lesquelles les petits pendules, dans le maximum de leur écart, viennent frapper en se déchargeant ; *ab* et *cd* (*fig.* 550) sont deux petites lames d'étain collées contre la surface intérieure du verre, et qui remplissent le même objet. On peut augmenter la sensibilité de l'instrument en plaçant les boules *a* et *b* (*fig.* 549) à une petite distance des feuilles d'or : elles sont alors électrisées par influence, et font diverger les feuilles d'or sous des tensions électriques beaucoup plus faibles que quand elles sont très-éloignées. On peut graduer ces instruments en en construisant deux aussi semblables que possible, et partageant successivement entre eux la charge électrique d'un seul : on obtient ainsi les déviations correspondantes à des charges 1, 1/2, 1/4, 1/8, etc. ; on obtient ensuite les déviations relatives à des charges intermédiaires par une construction graphique, et on les vérifie par d'autres expériences directes (Saussure).

On adapte ordinairement aux machines électriques l'électroscope *fig.* 551, connu sous le nom de Henley. Il est formé d'une tige d'ébène terminée par un demi-cercle en ivoire, au centre duquel est suspendue une paille garnie à son extrémité d'une petite boule de moelle de sureau. L'électromètre de Lane (*fig.* 540) a pour objet de décharger une bouteille de Leyde, lorsque l'électricité a acquis une tension limitée. Il est formé d'une bouteille de Leyde posée sur un plateau métallique, surmonté d'une tige métallique verticale, traversée à la partie supérieure et à la hauteur du bouton de la bouteille d'une tige horizontale, mobile dans une douille, et dont une des extrémités peut être amenée à une distance quelconque du bouton de la bouteille.

941. Mais, de tous les électroscopes, le seul qui soit ordinairement construit de

Digitized by Google

manière à donner des indications comparables, et d'où l'on puisse déduire la mesure des tensions électriques, est celui de Coulomb (*fig.* 552). Cet appareil est une véritable balance électrique, dans laquelle on a supprimé le tube *EF* (*fig.* 515), et dont le cylindre conducteur passe à travers l'épaisseur du verre.

942. Au moyen des électroscopes *fig.* 506 et 508, on reconnaît la présence de l'électricité dans un corps par le mouvement des boules vers le corps lorsqu'on l'approche à une petite distance. Au moyen des électroscopes *fig.* 547, 548, 549, 550 et 551, l'électricité renfermée dans un corps que l'on approche de la boule *a* est manifestée par l'écartement des pailles ou des boules; ces effets proviennent, comme nous l'avons déjà expliqué, de la décomposition à distance du fluide électrique naturel de la partie mobile de l'électroscope. Dans l'appareil de Coulomb, l'effet provient encore de la même cause; mais il y a une double décomposition : car, en approchant le corps *cd* (*fig.* 552) dont on veut reconnaître l'état électrique du conducteur *ab*, l'électricité, mise en liberté au point *b* par influence, agit à son tour de la même manière sur le disque de clinquant.

943. L'usage de la balance de Coulomb, telle que nous venons de la décrire et telle qu'il l'a employée, présente un grand inconvénient. A l'instant où elle est chargée, le levier mobile est repoussé vivement, et fait de nombreuses oscillations avant de se fixer. La durée totale de ces oscillations est variable avec la charge; et, la perte d'électricité par l'air et les supports diminuant la charge des boules d'une quantité variable, il en résulte que les expériences sont souvent bien incertaines quand l'air n'est pas très-sec.

Lorsqu'on a pour objet l'estimation ou la mesure de l'intensité d'une source continue, on peut faire disparaître les inconvénients que nous venons de signaler, en établissant une communication des boules fixes et mobiles avec la source : on obtient alors des déviations permanentes, et il n'y a plus d'autres causes d'erreurs que la variation de conductibilité de l'air. On peut pour cela disposer l'appareil de différentes manières. Supposons d'abord qu'il ne s'agisse que de constater la tension électrique d'une source très-faible, et le sens des variations qu'elle éprouve, on emploiera la disposition *fig.* 553. Un tube de verre recourbé à angle droit s'élève de quelques centimètres au-dessus du centre d'un plateau de bois *PQ*; ce tube est traversé par un fil de cuivre soudé à une tige de cuivre *AB*, placée horizontalement et recourbée. Au centre de cette tige se trouve une pointe fine verticale, supportant un fil métallique très-fin, recourbé dans un plan vertical, de manière que ses deux branches se trouvent à la hauteur de la tige *AB*, mais l'une d'un côté, et l'autre de l'autre; au sommet de ce fil se trouve une très-petite aiguille aimantée, destinée à lui donner une faible force directrice. Aux extrémités *C* et *D* se trouvent deux fils verticaux de gomme laque qui parcourent un cadran divisé. En tournant tout l'appareil de manière que l'aiguille aimantée soit dans la position qu'elle tendrait à prendre si elle était libre, et en mettant l'extrémité *S* du fil en contact avec une source d'électricité, l'aiguille *CD* sera déviée d'une manière permanente, et d'autant plus que la source sera plus énergique. Si on voulait rendre l'appareil encore plus sensible, il faudrait suspendre le levier mobile au moyen d'un fil de cocon dédoublé et de 20 à 30 centimètres de longueur; mais, pour que l'électricité parvienne à ce levier comme à la tige fixe, il faudrait y fixer au-dessus de la pointe un petit godet renversé, dans lequel elle pénétrerait sans le soutenir : par le contact, qui s'établirait naturellement, l'électricité se communiquerait au levier mobile. Pour obtenir des mesures avec ces appareils, on pourrait s'y prendre de deux manières. 1° On pourrait faire tourner le levier *AB* dans le sens de la déviation, de manière à obtenir des déviations constantes : alors la force électrique ferait équilibre dans chaque opération à celle de l'aiguille pour revenir à sa

Digitized by Google

position primitive, force qui, comme nous l'avons vu, est proportionnelle au sinus de la déviation sur la direction primitive. 2° On pourrait suspendre le levier mobile par un fil métallique, et employer la torsion comme dans la balance de Coulomb; mais il faudrait séparer le fil de suspension du levier mobile par un fil de gomme laque.

944. Au moyen de l'un quelconque de ces appareils, on peut facilement reconnaître l'espèce d'électricité libre que possède un corps. En effet, pour les électroscopes *fig.* 506 et 508, on commencera par les isoler en les plaçant sur une plaque de verre ou de résine, après quoi il faudra leur donner une petite quantité d'électricité positive ou négative; et pour cela on approchera de la boule de l'électroscope un corps possédant une électricité connue, par exemple un bâton de cire d'Espagne frotté : l'électricité négative passera dans la partie de l'appareil la plus éloignée, et l'électricité positive occupera la partie opposée. Si alors, avant de retirer le bâton de cire d'Espagne, on touche le support, l'appareil se trouvera électrisé positivement, et, suivant que le corps dont on veut reconnaître l'espèce d'électricité exercera une attraction ou une répulsion, on en conclura la nature de son électricité. En approchant de même un corps possédant une électricité connue des électroscopes *fig.* 547 et 549, et en touchant le bouton avant de retirer le corps, on donnera à l'appareil une électricité contraire qui fera écarter les fils; et, suivant que cet écart sera augmenté ou diminué par la présence d'un nouveau corps, il possédera une électricité de même nature ou de nature différente de celle du corps qui a servi d'abord. Il est évident qu'il faudrait opérer de la même manière pour l'électroscope de Coulomb.

Nous venons de dire que, lorsqu'un électroscope était chargé d'électricité, on pouvait reconnaître l'espèce d'électricité d'un autre corps en l'approchant du corps conducteur qui supporte les pendules; que, si la divergence était augmentée, le corps possédait la même espèce d'électricité que l'appareil, et que, si la divergence diminuait, le corps était chargé d'une électricité contraire. La première partie de cette proposition est exacte; mais la seconde ne l'est pas toujours, parce qu'un corps à l'état naturel peut produire le même effet, étant électrisé par l'influence de l'électricité de l'appareil. Alors, pour que la diminution de divergence soit une preuve décisive, il faut qu'elle soit très-grande, et qu'en approchant toujours davantage le corps, la divergence devienne nulle, et qu'ensuite il se manifeste de nouveau une répulsion.

945. Lorsque dans certains phénomènes il ne se développe que de très-petites quantités d'électricité, les instruments que nous venons de décrire ne sont souvent pas assez sensibles pour qu'on puisse les reconnaître. Volta a imaginé d'accumuler ces petites quantités dans un appareil capable de les retenir, afin d'obtenir des tensions appréciables et dont on puisse reconnaître la nature. L'appareil que nous allons décrire est connu sous le nom d'*électroscope condensateur*. Il est composé (*fig.* 554) d'un électroscope à paille ou à lames d'or, au-dessus duquel se trouve un condensateur dont la surface du plateau inférieur est couverte d'une couche de vernis; il est en communication directe avec les pailles, et armé inférieurement d'une tige *mn*, terminée par une boule. On fait communiquer le plateau supérieur avec le sol et on touche la boule *o* avec le corps faiblement électrisé: les charges s'accumulent, et lorsqu'on sépare le plateau supérieur, les pailles divergent plus ou moins par l'électricité accumulée, dont on peut facilement reconnaître la nature par les moyens indiqués plus haut. Le plateau inférieur a reçu le nom de *collecteur*.

Quand l'air est humide, l'électricité se perd promptement, et il serait impossible de faire des expériences comparables si l'on n'avait soin de dessécher l'air intérieur et extérieur de l'électroscope avec des matières très-hygrométriques, telles que la chaux vive, le chlorure de calcium, etc. La meilleure disposition est celle représentée *fig.* 555. La cloche de l'électroscope est environnée d'une cage carrée, reposant sur

Digitized by Google

le même plateau ; on met une substance hygrométrique dans un tiroir placé dans le support *MN* qui communique avec la cloche intérieure et avec l'espace qui la sépare de la cloche extérieure.

946. *Effets produits par la neutralisation des électricités accumulées.* La plupart des effets que nous allons décrire peuvent s'obtenir avec une simple bouteille de Leyde, dont on fait communiquer les armures par le corps à travers lequel la décharge doit passer. Mais pour produire de très-grands effets on réunit plusieurs bouteilles de Leyde sur un plateau métallique, de manière à faire communiquer leurs armures extérieures et on réunit par des tringles leurs armures intérieures (*fig.* 556). Cette disposition porte le nom de *batterie électrique.* On peut aussi former des batteries électriques d'une manière plus simple, en prenant des lames de verre à vitre que l'on recouvre des deux côtés de lames d'étain jusqu'à 2 ou 3 pouces des bords, les plaçant les unes sur les autres, et faisant communiquer entre elles, par des fils métalliques placés de deux côtés opposés, les armures de rangs pairs et celles de rangs impairs.

947. *L'électricité suit toujours de préférence les bons conducteurs.* Ainsi on peut impunément décharger une bouteille de Leyde et même une batterie, au moyen d'un fil de cuivre que l'on met en communication avec les deux armures et que l'on tient à la main, ou qui entoure le corps; pourvu toutefois que le conducteur ait des dimensions suffisantes : car, dans le cas contraire, une partie de la décharge se ferait à travers les organes. L'eau salée conduit mieux l'électricité que nos organes, et ces derniers mieux que l'eau pure : aussi lorsque l'on met les deux armures d'une batterie en communication à la fois par de l'eau et avec les mains, on reçoit une forte commotion si l'eau est pure, et on n'en éprouve aucune si l'eau est salée. Prisley, d'après des expériences que nous rapporterons bientôt, range les métaux dans l'ordre suivant, sous le rapport de leur conductibilité : *or, argent, cuivre, laiton, fer.* Ce même physicien a constaté que la chaleur augmentait la conductibilité des corps mauvais conducteurs et diminuait celle des bons conducteurs. Quand on établit la communication entre les deux armures par plusieurs corps dont les facultés conductrices diffèrent peu, ou quand, la différence étant très-grande, celui qui conduit le mieux ne pourrait pas décharger instantanément la batterie, l'électricité se distribue entre les conducteurs suivant des lois encore inconnues, mais toujours de manière que la plus grande quantité d'électricité passe par les corps qui conduisent le mieux; dans ce cas, la conductibilité des corps dépend non-seulement de celle de la matière qui les constitue, mais encore de leurs dimensions. Il est probable que pour les corps cylindriques, propageant l'électricité dans le sens de leur longueur, la faculté conductrice est proportionnelle à celle de la matière, à la surface de la section perpendiculaire à l'axe et en raison inverse de la longueur.

948. *Choc latéral.* Lorsqu'un conducteur de dimensions suffisantes établit la communication entre les deux armures d'une batterie, le courant qui le traverse agit pendant la courte durée de son trajet sur les corps environnants, les électrise par influence, et la recomposition rapide du fluide neutre produit souvent de légères commotions. Ce phénomène, qui est désigné sous le nom de *choc latéral*, peut être constaté en plaçant dans le voisinage d'une batterie un conducteur en communication avec le sol et garni d'un petit électroscope à pendule : par la décharge de la batterie, le petit pendule est vivement agité.

949. *Effets physiologiques.* Les effets produits sur nos organes par la décharge d'une bouteille de Leyde sont d'autant plus énergiques que les armures ont une plus grande surface, et que la charge est plus forte. Cet effet se transmet à travers une chaîne composée d'un nombre quelconque de personnes qui se tiennent par les mains : chacune d'elles éprouve la même commotion. Avec de puissantes batteries, on

Digitized by Google

parvient à tuer des animaux même d'une grande taille, et par conséquent il serait très-dangereux d'en recevoir la décharge.

950. *Effets physiques produits par la décharge d'une batterie dans les corps mauvais conducteurs, ou par leur nature, ou par leurs dimensions.* Lorsqu'on fait passer la décharge d'une batterie à travers un corps mauvais conducteur par l'une des deux circonstances énoncées, le corps peut être percé, déchiré ou disséminé; et quand il résiste à cette action mécanique, il s'échauffe plus ou moins, souvent de manière à rougir, à se liquéfier, ou à brûler, suivant les circonstances. Avant de citer des faits particuliers, nous décrirons l'appareil dont on se sert pour faire passer la décharge d'une batterie à travers un corps quelconque.

Cet appareil, connu sous le nom d'*excitateur universel*, se compose (*fig.* 557) de deux branches *ab* et *a'b'*, montées à charnière sur des colonnes isolantes *cd* et *c'd'*; elles entrent à frottement libre dans les douilles *e c*, *e' c'*, afin que leurs extrémités puissent être amenées à une distance quelconque. Le support *mn*, que l'on peut placer à différentes hauteurs, est destiné à recevoir le corps à travers lequel on veut faire passer la décharge; on met ses extrémités en contact avec celles des tiges *ab* et *a'b'*. Une d'elles est en communication permanente avec une des deux armures de la batterie, et, à l'aide de l'excitateur *fig.* 536, on établit la communication de l'autre armure avec l'autre tige.

951. Lorsqu'on place une carte entre deux conducteurs terminés par une pointe (*fig.* 558), et qu'on fait passer entre les pointes la décharge d'une bouteille de Leyde, la carte se trouve percée d'un trou très-fin, mais qui n'est point au milieu de l'espace qui sépare les deux pointes; il est beaucoup plus rapproché de la pointe communiquant avec l'armure chargée d'électricité négative. M. Trémery, à qui on doit cette observation, a remarqué qu'à mesure que l'on diminuait la pression de l'air, le trou de la carte se rapprochait du milieu de l'intervalle des deux pointes. Ce phénomène est sans explication.

952. On peut aussi, à l'aide de la décharge d'une bouteille de Leyde, percer une lame de verre. On se sert pour cet objet de l'appareil *fig.* 559. *ab* et *cd* sont deux supports réunis par la traverse horizontale *ef*, à travers laquelle passe le conducteur à pointe *mn*; *ghik* est un cylindre de verre qui enveloppe l'autre conducteur à pointe *m'n'*, et supporte la lame de verre *xy*. On met une goutte d'huile sur la lame de verre, en face des pointes, et on met les deux conducteurs en communication avec les armures d'une forte bouteille de Leyde.

Lorsqu'on remplace la lame de verre par une lame de pierre, l'étincelle la brise dans plusieurs directions. Il en est de même d'une lame de bois perpendiculaire à la direction des fibres. Si on fait passer la décharge à travers un tube de verre capillaire plein de mercure, le tube se brise, si la décharge est assez forte.

953. Lorsque l'étincelle passe à travers l'air ou un gaz quelconque, les molécules de ces corps sont fortement ébranlées; pour constater ce fait, on peut employer l'appareil *fig.* 559*A*, qui est dû à Kinnersley. Il est composé d'un cylindre de verre fermé à chaque extrémité par une virole en cuivre traversée par une tige terminée par un bouton; le cylindre est garni, à sa partie inférieure, d'un tube *ab*, qui s'élève parallèlement au cylindre, et qui est ouvert; l'appareil est plein d'air ou du gaz sur lequel on veut opérer, et il renferme une certaine quantité d'un liquide coloré: lorsqu'on fait passer une étincelle électrique entre les deux boules, le liquide s'élève dans le tube *ab* à une hauteur d'autant plus grande que l'étincelle est plus forte. On pourrait disposer l'appareil d'une manière plus simple. *ab* (*fig.* 560) est un tube de verre capillaire, ouvert par sa partie supérieure *a*, renfermant un index de mercure *m*, et communiquant, par sa partie inférieure, avec un tube d'un plus grand diamètre, percé latéralement de deux ouvertures, dans lesquelles sont mastiquées deux tiges

Digitized by Google

métalliques terminées par des boules : lorsqu'une étincelle traverse l'intervalle des deux boules extérieures, l'index *m* éprouve une vive agitation.

954. Lorsqu'on place une feuille d'or très-mince entre deux plaques de verre, et qu'on fait passer la décharge à travers la lame d'or, on obtient une poudre violette, qui n'est autre chose que de l'or très-divisé, et non de l'oxyde : car à la température que l'or a dû acquérir l'oxyde aurait été réduit, s'il s'était formé. On fait ordinairement cette expérience de la manière suivante : sur un carton découpé on place une feuille d'or, au-dessous un ruban de soie blanche; on serre le tout entre deux planches, on fait passer une forte décharge à travers l'or, et on trouve sur le ruban de soie une empreinte violette de la découpure.

955. Fusinieri a fait l'observation très-curieuse qu'un courant électrique peut transporter des matières solides à travers d'autres corps solides. Par exemple, si on place un disque d'argent poli à égale distance d'une boule d'or qui communique avec l'armure intérieure d'une petite batterie, et d'une boule d'argent qui communique avec l'armure extérieure, on observe, après la décharge, deux taches d'or parfaitement égales en diamètre sur les deux faces du disque d'argent. D'autres métaux sont également transportés par l'étincelle et viennent se déposer sur les surfaces des corps qu'elle rencontre, tantôt à l'état métallique, tantôt à l'état d'oxyde.

956. Lorsque les corps à travers lesquels on fait passer la décharge sont bons conducteurs, et ont des dimensions très-grandes, perpendiculairement à la direction du courant, par exemple quand ce sont des fils métalliques d'une grande section, ils n'éprouvent aucunes modifications; mais, si on diminue progressivement leur section, ou si on augmente leur longueur, on s'aperçoit que, pour les mêmes décharges, ces fils s'échauffent d'autant plus qu'ils ont un plus petit diamètre ou une plus grande longueur; et quand leur ténuité est très-grande, ils peuvent s'échauffer jusqu'au rouge, et brûler s'ils sont combustibles. Les fils métalliques de même longueur, et de même diamètre s'échauffent inégalement par des décharges électriques égales. L'ordre des métaux rangés suivant leur faculté d'être échauffés est inverse de celui où ils sont rangés suivant leurs facultés conductrices.

Tous les phénomènes physiques que nous venons de décrire paraissent dus au flux d'électricité qui se trouve arrêté par le défaut de conductibilité du corps, soit en raison de sa nature, soit en raison de ses dimensions. D'après cela, la conductibilité n'a rien d'absolu; elle dépend à la fois de la nature du corps, de ses dimensions, et de la quantité d'électricité qui doit passer : un même corps conduit d'autant mieux que ses dimensions sont plus petites dans la direction de la transmission et plus grandes dans la direction perpendiculaire; et pour un même corps, quelles que soient sa nature et ses dimensions, on conçoit qu'il doit exister une charge pour laquelle il cesserait, en partie du moins, d'être conducteur. Ces dernières observations sont parfaitement d'accord avec les résultats des expériences de Coulomb sur les corps isolants, et auraient pu s'en déduire.

957. *Effets chimiques.* Lorsqu'on place sur une lame de verre un petit morceau de papier de tournesol humide, qu'on fait communiquer une des extrémités avec le conducteur positif de la machine, et l'autre par un fil avec le sol ou avec les coussins, ou qu'on le met en contact avec un fil isolé terminé par une pointe, le papier de tournesol est rougi au point où il reçoit l'électricité positive. Si, au lieu du papier de tournesol, on emploie du papier coloré par du sirop de violette, il rougit à une extrémité et verdit à l'autre. Lorsqu'on place sur une lame de verre, à la suite les uns des autres, de petits losanges de papier coloré avec du sirop de violette humide, et qu'on fait communiquer l'extrémité du premier losange avec le conducteur positif, et l'extrémité du dernier avec le sol, ou avec le frottoir, ou avec une pointe isolée

Digitized by Google

toutes les extrémités des losanges qui sont tournées vers le conducteur positif sont rougies, et toutes les autres sont verdies. En remplaçant chaque losange par deux triangles, l'un de papier de tournesol, l'autre de papier de curcuma humide, et réunis par leur base, tous les triangles de papier de tournesol étant d'un même côté, le dernier communiquant avec le conducteur positif, tous les triangles sont rougis à leur sommet. Or il résulte des propriétés bien connues des diverses matières colorantes employées que les changements de couleur observés aux pointes dirigées vers le conducteur positif sont dus à la présence d'un acide, et que les changements aux points opposés sont dus à la présence d'un alcali : par conséquent, on doit nécessairement admettre que l'électricité, en parcourant les bandes de papier humide et coloré, a décomposé les sels qu'elles renferment; que les acides résultant de cette décomposition ont été portés vers le conducteur positif, et les alcalis vers l'extrémité opposée, et que là, par leur réaction sur la matière colorante, ils ont produit les changements observés.

On peut d'ailleurs reconnaître par des expériences directes qu'un courant électrique jouit de la propriété de décomposer les sels : en effet, si on prend deux fils d'argent terminés par des pointes aiguës, et qu'après avoir entouré les fils avec de la cire, jusqu'aux extrémités, on les mette en communication avec les deux conducteurs d'une machine de Nairne, et qu'on plonge les pointes dans une dissolution d'un sel de cuivre, en très-peu de temps on reconnaît que la pointe d'argent qui communique avec le conducteur négatif se couvre de cuivre.

958. Lorsqu'on fait passer une forte décharge électrique à travers un fil de laiton très-fin, on trouve de l'oxyde de zinc et de cuivre isolés : par conséquent, ces métaux ont été séparés avant leur oxydation. Lorsqu'on place dans un tube de verre des oxydes d'or, d'argent, d'étain, ou de sulfure de mercure, et qu'on fait passer dans le tube une forte décharge, les oxydes sont réduits et le sulfure est décomposé.

On peut aussi décomposer les huiles et l'éther par une série d'étincelles électriques : pour cela, on remplit d'huile ou d'éther une petite cloche reposant sur du mercure, et dont la partie supérieure est traversée par un fil de platine qui descend jusqu'à une petite distance de la surface du mercure. En mettant le fil en communication avec le conducteur d'une machine, et le mercure en contact avec le sol, les étincelles qui passent de l'extrémité du fil au mercure décomposent le liquide; les huiles donnent de l'hydrogène carboné, de l'hydrogène et de l'oxygène en diverses proportions.

959. En faisant passer ainsi des étincelles électriques à travers certains gaz, on parvient à les décomposer. L'*hydrogène carboné*, l'*hydrogène sulfuré*, l'*ammoniaque*, l'*hydrogène phosphoré*, l'*acide hydrochlorique* et le *protoxyde d'azote*, le sont en totalité et dans leurs éléments simples. L'*acide carbonique* est décomposé, en partie seulement, en oxygène et oxyde de carbone; le *deutoxyde d'azote* en acide nitreux et azote; le *gaz nitreux* en acide nitrique et azote.

960. Lorsqu'on fait passer une seule étincelle à travers un mélange de différents gaz qui peuvent se combiner, la combinaison a toujours lieu quand les gaz mêlés sont dans des proportions qui diffèrent peu de celles dans lesquelles ils se combinent; la présence d'un gaz étranger n'a point d'influence quand il est en petite proportion.

Lorsqu'une longue série d'étincelles électriques traverse l'air atmosphérique, le volume diminue, et il se forme une petite quantité d'acide nitrique.

961. En faisant passer de violentes décharges électriques à travers l'eau, les explosions sont accompagnées d'étincelles, et une certaine quantité d'eau est décomposée. Wollaston est parvenu à produire la décomposition de l'eau en conduisant de

Digitized by Google

faibles courants électriques dans ce liquide par des fils très-fins terminés par des pointes aiguës, et isolées de manière à ne pouvoir perdre leur électricité que par les extrémités de ces pointes. On conçoit qu'une quantité d'électricité même très-faible, qui se porte au sommet de la pointe, et dont l'énergie s'exerce tout entière contre la seule molécule d'eau qui la touche, doit produire un effet beaucoup plus grand que quand l'électricité se dégage par une grande surface d'un corps conducteur.

Pour cela, on prend un fil d'or très-fin, et, après lui avoir donné une pointe aussi aiguë qu'on peut le faire, on l'insère dans un tube capillaire de verre, on chauffe ce tube assez pour l'attacher à la pointe et la recouvrir bien complétement; on use ensuite par le frottement cette extrémité jusqu'à ce que, avec une loupe, on puisse découvrir la pointe d'or qui commence à se faire jour. Alors, en plongeant cette extrémité dans de l'eau qui est en communication avec le sol, et faisant passer sur l'autre extrémité des étincelles partant du conducteur d'une machine électrique, à chaque explosion on voit des bulles de gaz se dégager de la pointe; la force de l'étincelle nécessaire pour produire ce phénomène dépend de la finesse de la surface libre de la pointe. Wollaston a trouvé qu'une étincelle qui se manifeste à une distance de 1/8 de pouce suffisait quand le diamètre de l'extrémité de la pointe ne surpassait pas $\frac{1}{700}$ de pouce, et qu'une étincelle faisant explosion à une distance de $\frac{1}{20}$ de pouce suffisait pour décomposer l'eau quand le diamètre de la pointe était à peu près de $\frac{1}{2503}$ de pouce.

Pour essayer jusqu'à quel degré la force de l'étincelle électrique pourrait être réduite par une diminution proportionnée dans l'extrémité du fil, Wollaston introduisit dans un tube capillaire une solution d'or dans l'eau régale, et, en chauffant le tube, il fit évaporer l'acide. Il resta une couche d'or très-mince qui garnissait l'intérieur du tube; alors en chauffant le tube jusqu'au point de le ramollir, il se forma un fil d'or très-mince au milieu de la substance du tube. En plongeant une des extrémités du tube dans de l'eau, et en mettant l'autre extrémité en contact avec le conducteur d'une machine électrique, l'eau fut décomposée par le courant électrique, quoiqu'il ne se produisît point d'étincelle visible dans tout le trajet.

962. *Lumière électrique.* La combinaison des deux électricités dans un milieu non conducteur et l'écoulement de l'un d'eux dans l'air sont toujours accompagnés de lumière. C'est Otto de Guericke qui observa le premier l'étincelle électrique. La lumière paraît différer dans les deux fluides : car lorsqu'un conducteur armé d'une pointe est chargé d'électricité positive, on aperçoit à l'extrémité de la pointe une belle aigrette, tandis que, s'il est chargé d'électricité négative, on n'aperçoit qu'un point lumineux.

963. *Vitesse de l'électricité.* Lorsqu'un corps est bon conducteur, l'électricité le parcourt avec une rapidité extrême. En 1745 et 1750, on fit en Angleterre des expériences pour apprécier la vitesse avec laquelle l'électricité se transmet à travers les métaux, et on reconnut que des fils métalliques isolés, de plus d'une lieue de longueur, transmettaient instantanément l'électricité.

964. Lorsque l'électricité traverse l'intervalle qui sépare deux conducteurs, on aperçoit une ligne droite continue, en raison de la durée de la sensation. M. Wheatstone a essayé de mesurer la vitesse avec laquelle l'étincelle traverse l'espace, par le moyen que nous allons rapporter. Une boule métallique fixe était mise en communication avec le conducteur d'une machine électrique; une autre boule, communiquant avec le sol, passait rapidement sous la première, à une distance de 4 pouces.

Digitized by Google

Il est évident que, si la vitesse de la dernière boule était comparable à la vitesse de l'électricité, la traînée lumineuse aurait dû paraître oblique, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, suivant le sens du mouvement de la boule mobile; mais l'expérience a démontré que, quelle que soit la vitesse, l'étincelle passait de la même manière que quand les deux conducteurs sont en repos. Pour mesurer la vitesse de l'électricité dans les corps conducteurs, M. Wheatstone s'est servi d'un miroir plan, vertical, mobile autour d'un axe vertical parallèle à l'étincelle. Il est facile de voir que dans un semblable miroir un point lumineux fixe produit une image circulaire, dont le rayon est égal à la distance du point lumineux à l'axe de rotation, et que la vitesse angulaire de l'image étant double de celle du miroir, la circonférence entière sera décrite pendant une demi-révolution du miroir; et si le revers du miroir est aussi une surface réfléchissante, l'image parcourra deux circonférences entières pendant chaque révolution complète du miroir. Il résulte évidemment de là que, si l'étincelle a une durée appréciable relativement à la vitesse de rotation du miroir, on verra un arc lumineux dans le sens du mouvement, et l'étendue de cet arc dépendra de la durée de l'étincelle. Supposons maintenant qu'on place devant le miroir le conducteur représenté fig. 362 interrompu aux points *a*, *b* et *c*; si on met les extrémités *p* et *q* en communication avec les armures d'une bouteille de Leyde, l'étincelle se manifestera au point *b* après que l'électricité aura parcouru le chemin *amb*; et par conséquent, si l'électricité parcourt ce chemin dans un temps appréciable, les trois arcs lumineux qu'on verra dans le miroir ne devront pas partir de la même ligne verticale : le premier et le dernier devront être un peu plus avancés dans le sens du mouvement du miroir. Dans une des expériences, l'intervalle angulaire des origines des deux arcs extrêmes et de celui du milieu correspondait à un millionième de seconde; et comme le conducteur avait 0,288 milles de longueur, il en résultait une vitesse de 288000 milles par seconde, vitesse qui surpasse celle de la lumière dans le vide.

965. Lorsqu'on prend un tube de verre terminé par deux appendices conducteurs, qu'après y avoir fait le vide on le met en contact, par une de ses extrémités, avec une machine électrique, et qu'on fait communiquer l'autre avec le sol, toute sa capacité intérieure se trouve éclairée uniformément; mais si on approche un corps conducteur, l'électricité se porte vers lui, et la lumière acquiert plus d'éclat dans les parties du tube voisines du corps conducteur. Cet effet s'explique facilement, en observant que le courant électrique decompose par influence l'electricité naturelle du conducteur, et que celle qui s'accumule dans la partie du conducteur la plus voisine du tube réagit sur le courant électrique qui le traverse.

966. Pour observer les variations que présente la lumière électrique suivant la force élastique de l'air dans lequel elle se manifeste, on emploie l'appareil *fig.* 361, qui est composé d'un ballon de verre à robinet, garni de deux tiges à boules que l'on peut rapprocher plus ou moins, une d'elles pouvant glisser dans une boîte à cuir. En dilatant plus ou moins l'air du ballon à l'aide d'une machine pneumatique, on observe qu'à mesure que la densité de l'air diminue, la lumière électrique occupe un espace terminé aux deux boules, et d'autant plus dilaté vers le milieu que la densité de l'air est plus petite; et que dans le vide la lumière occupe toute la capacité du ballon. Quand l'espace lumineux augmente, l'intensité de la lumière s'affaiblit. On n'a fait aucune expérience pour déterminer le rapport entre le volume occupé par la lumière et son intensité; il serait possible que la diminution de lumière provînt uniquement de l'accroissement de volume. On pourrait vérifier cette conjecture en se plaçant à des distances du ballon telles que l'espace lumineux fût aperçu sous le même diamètre apparent : l'éclat devrait rester constant si notre conjecture est vraie.

Digitized by Google

967. On a expliqué la lumière électrique par la compression subite que l'air éprouve, compression qui produit un dégagement de chaleur et de lumière d'autant plus grand que l'air est plus dense. Le choc de l'air n'est point cependant une explication suffisante de la lumière électrique, puisque cette lumière se manifeste encore dans le vide barométrique, et à une température inférieure à celle où il paraît que les vapeurs mercurielles cessent d'exister (579). Elle n'est même point suffisante pour expliquer les variations d'intensités de lumière suivant les pressions : car, si la lumière est d'autant plus vive que l'air est plus dense, comme en même temps la résistance de l'air est plus grande, le dégagement de l'électricité n'a lieu que sous une plus grande tension : par conséquent, la lumière croissant à mesure que l'explosion a lieu à une plus forte tension, on pourrait regarder la lumière en question comme inhérente à l'électricité, et se développant proportionnellement à la densité de la couche qui fait explosion.

La teinte de la lumière de l'étincelle électrique varie avec la nature du gaz dans lequel l'explosion a lieu, avec sa force élastique et avec la nature des corps entre lesquels l'explosion s'effectue. L'étincelle est blanche dans l'acide carbonique, rougeâtre dans l'hydrogène, blanche dans l'air comprimé, rougeâtre dans l'air raréfié, d'un vert brillant dans la vapeur de mercure, et, en y ajoutant une quantité croissante d'air, la teinte passe successivement au vert de mer, au bleu et au pourpre. Les étincelles tirées avec des boules de bois et d'ivoire ont une teinte cramoisie; avec du cuivre argenté, elles ont une teinte verte; avec du charbon, la teinte est jaune; Fusinieri pense que ces variations de couleur de l'étincelle électrique proviennent de l'incandescence des molécules pondérables entraînées par l'électricité.

968. Nous terminerons ce qui est relatif à la lumière électrique par la description de quelques expériences fort curieuses, et qui sont fondées sur la rapidité du mouvement de l'électricité. Lorsqu'on place une série de conducteurs à la suite les uns des autres, si l'intervalle qui les sépare est très-petit, en mettant les deux extrêmes en contact avec les deux armures d'une bouteille de Leyde, l'étincelle électrique se manifeste au même instant dans tous les intervalles; c'est sur ce principe que sont fondés les appareils électriques qu'on désigne sous le nom de *tubes étincelants, carreaux étincelants*, etc.

Les tubes étincelants (*fig.* 563) sont des tubes recouverts à leur surface de petites lames d'étain ayant la forme d'un losange, et disposées suivant une hélice; leurs sommets sont en regard, et très-voisins. En mettant les deux extrémités du tube, qui sont garnies d'appendices conducteurs, en contact avec les deux armures d'une bouteille de Leyde, ou seulement en approchant une des extrémités du conducteur d'une machine électrique, l'autre communiquant avec le sol, l'étincelle passe simultanément dans les lames et dessine une hélice. On dispose aussi les petites lames d'étain sur des plaques des verre, de manière à former, par les intervalles qui les séparent, des dessins quelconques, qui se trouvent alors illuminés par le passage d'une étincelle électrique (*fig.* 564).

969. Le *carreau magique* est une lame de verre dont une des faces est recouverte d'une lame d'étain, et dont l'autre est recouverte d'un vernis mêlé avec une poudre métallique. Cet appareil se charge comme un condensateur; en le déchargeant, l'étincelle serpente dans tous les sens, et imite l'effet de la foudre.

§ III. *Développement de l'électricité par la pression.*

970. La première expérience qui conduisit à reconnaître dans la pression une cause de développement d'électricité est due à M. Libes. Ce physicien découvrit

Digitized by Google

qu'en pressant un disque métallique isolé contre du taffetas gommé, celui-ci prend l'électricité positive, et le disque métallique l'électricité négative; par la pression avec frottement, le taffetas prend au contraire l'électricité négative. Hauy constata ensuite que le spath d'Islande et quelques autres substances minérales jouissaient de la propriété d'être électrisées par la pression entre les doigts. M. Becquerel, qui depuis s'est occupé d'une manière spéciale de ces phénomènes, est parvenu à des faits généraux que nous allons rapporter.

971. Quand deux corps de nature quelconque dont l'un est élastique, étant isolés, sont pressés l'un contre l'autre, ils se constituent dans deux états électriques différents; mais ils ne sortent de la compression avec de l'électricité libre qu'autant que l'un des deux n'est pas un bon conducteur. Il paraît que l'intensité de l'état électrique après la séparation dépend de la conductibilité des deux corps et de la vitesse de séparation : car, pendant la durée de la pression, les deux couches électriques séparées étant en équilibre, comme M. Becquerel s'en est assuré, l'équilibre ne subsiste que par le seul fait de la pression; si on la diminue lentement, les électricités qui ont été séparées se combineront de nouveau avec d'autant plus de facilité que la séparation sera plus lente et que les fluides se mouvront plus aisément dans les corps : aussi on obtient toujours une tension électrique d'autant plus grande que la séparation a été plus rapide.

L'eau hygrométrique qui recouvre la surface des corps empêche souvent l'électricité de rester après la séparation, probablement parce qu'elle les rend bons conducteurs; aussi il faut avoir soin de sécher et d'essuyer les corps avant de les soumettre à l'expérience. M. Becquerel, au moyen d'un appareil très-ingénieux, a découvert que l'électricité développée par la pression, dans le cas où la vitesse de séparation donnait le maximum d'électricité, était proportionnelle à la pression jusqu'à une certaine limite. Les corps élastiques dont M. Becquerel s'est servi sont des plaques de liége, de caoutchouc, d'amadou, d'écorce d'orange, de moelle de sureau, isolées par des manches de gomme laque.

972. La chaleur a une grande influence sur le développement de l'électricité par la pression. Le spath d'Islande, qui par la pression prend l'électricité positive, acquiert de l'électricité négative lorsque sa température a été suffisamment élevée. Deux corps de même nature, tels que deux morceaux de liége, de spath d'Islande, pressés, s'électrisent rarement; mais lorsque l'un d'eux est échauffé, ils se trouvent tous deux, après la séparation, dans deux états électriques opposés; si la pression dure jusqu'à ce que l'équilibre de température ait lieu, les corps séparés ne sont plus électrisés.

973. Plusieurs phénomènes paraissent avoir beaucoup d'analogie avec ceux que nous venons de décrire. Lorsqu'on sépare dans l'obscurité deux lames de mica, il y a dégagement de lumière, et si, avant la séparation, on fixe les lames à deux manches isolants, on trouve les lames électrisées en sens contraire. La chaux sulfatée présente le même phénomène; mais, pour l'observer, il faut la priver de son eau hygrométrique, et élever la température; une carte dédoublée donne des résultats analogues. Cependant, le développement de l'électricité par exfoliation ne paraît convenir, à quelques exceptions près, qu'aux substances régulièrement cristallisées : car les fragments d'un bâton de verre ou de résine ne possèdent aucune électricité.

Le choc, produisant une compression subite, doit nécessairement développer de l'électricité; il serait possible que la lumière qui l'accompagne quelquefois provînt de la combinaison rapide des électricités, qui auraient été séparées par la pression.

Digitized by Google

§ IV. *Examen des circonstances qui accompagnent le développement de l'électricité par le frottement ou la pression.*

974. Tous les corps, comme nous l'avons déjà dit, paraissent dégager de l'électricité par le frottement; le plus grand dégagement a lieu lorsqu'un des corps frottés est mauvais conducteur et l'autre très-bon conducteur de l'électricité; il est très-faible, au contraire, quand les deux corps sont à la fois bons conducteurs; il est même difficile de reconnaître l'électricité dégagée par le frottement des métaux en masses, au moyen d'un électromètre; mais on peut constater ce dégagement, en mettant les deux métaux en communication avec un rhéomètre multiplicateur très-sensible (instrument formé d'un fil de cuivre recouvert de soie, enroulé autour d'un cadre dont le centre est occupé par une aiguille aimantée). Il se développe, par le frottement, des courants électriques dans le fil de l'instrument, dont le sens et l'intensité se reconnaissent à la nature et l'amplitude des déviations de l'aiguille, et qui permettent de déterminer l'espèce d'électricité que prend chaque métal.

975. M. Becquerel, à qui on doit la découverte du fait dont il est question, fixe les extrémités des lames des métaux qui doivent être frottés aux extrémités du fil du rhéomètre, et recouvre de mastic les points de jonction, afin d'éviter les courants électriques qui pourraient résulter des changements de température de ces points : en posant les lames les unes sur les autres, il ne se produit rien; mais en les frottant légèrement, il se produit un courant. D'après ces expériences, M. Becquerel a formé le tableau suivant, dans lequel chaque métal est négatif par rapport à ceux qui suivent, et positif par rapport à ceux qui précèdent.

Bismuth.	Plomb.	Zinc.
Nickel.	Étain.	Fer.
Cobalt.	Or.	Cadmium.
Palladium.	Argent.	Antimoine.
Platine.	Cuivre.	

Cet ordre est le même que celui relatif à l'électricité développée par la chaleur, comme nous le verrons plus tard. Il ne change pas par le poli ou les aspérités des surfaces frottantes; il en est encore de même quand un des corps est très-petit par rapport à l'autre, et que ce sont toujours les mêmes points qui frottent : d'où il suit que la chaleur développée est sans influence, car le corps le plus petit devrait s'échauffer plus que l'autre, et l'effet devrait changer suivant que l'un ou l'autre des corps frottés serait le plus petit, ce qui n'a pas lieu. Si on prend une lame et un bouton de même nature, en frottant le bouton contre la lame, le bismuth, l'antimoine, le fer et le platine produisent un courant dans lequel le bouton est positif, ce qui est contraire à l'effet qui serait produit si les courants provenaient de la chaleur dégagée, attendu que le bouton s'échauffe plus que la lame; le cuivre et plusieurs autres métaux agissent en sens contraire.

976. Lorsqu'on fait frotter deux métaux dont l'un est en limailles fines, la conductibilité dans ce dernier est assez affaiblie pour que l'on puisse reconnaître directement par l'électroscope l'électricité dont il s'est chargé. Voici la disposition employée par M. Becquerel. On tient à la main une lame métallique inclinée, sur laquelle on verse la limaille, qui tombe ensuite dans une capsule fixée au plateau d'un électroscope à feuilles d'or très-sensible. M. Becquerel a reconnu ainsi que, quand une limaille métallique passe sur une lame de même métal, elle prend l'électricité néga-

Digitized by Google

tive. L'effet est d'autant plus marqué que la limaille est plus fine et le choc plus rapide. La propriété des limailles d'être négatives par rapport aux plaques du même métal est d'autant plus marquée que les métaux sont plus facilement oxydables; l'antimoine fait exception, sa limaille est positive par rapport aux plaques de même substance. Lorsque la limaille et la plaque sont de natures différentes, les limailles tendent à prendre l'électricité négative; lorsqu'on élève la température de la limaille, ou de la limaille et de la plaque, la limaille devient plus négative si elle l'était à la température ordinaire, et devient négative, ou moins positive, si elle était primitivement positive.

En donnant un mouvement rapide de rotation à une lame autour d'un axe vertical, établissant la communication de la lame avec l'électroscope, et laissant tomber des limailles plus ou moins fines sur la lame, M. Becquerel a reconnu qur le peroxyde de manganèse, l'argent très-divisé et le sulfure de fer, projetés sur une lame de zinc, d'étain ou d'or, prennent l'électricité négative. La poudre de peroxyde de manganèse produit plus d'effet que les autres substances. La limaille de zinc ne produit aucun effet quand elle tombe sur une plaque de zinc dont le mouvement est rapide, tandis qu'elle reçoit un excès d'électricité négative quand la lame est en repos. On n'obtient point d'électricité quand les limailles ont plusieurs millimètres d'épaisseur.

Dans le frottement des limailles contre les plaques métalliques il ne se produit point de courants, probablement à cause de la faible conductibilité des limailles.

977. Lorsque les corps sont mauvais conducteurs, l'état de leur surface et l'inégalité de leur température primitive, ou celle qui résulte de la chaleur dégagée par le frottement, ont une si grande influence, qu'avec les mêmes substances on obtient souvent des résultats opposés. Une légère différence dans l'état de la surface de deux corps de même nature frottés l'un contre l'autre, ou une différence dans leur température, ou une différence dans l'étendue des surfaces qui sont frottées, suffit pour développer dans les deux corps des électricités différentes. Toujours le corps dont la surface est la moins polie, ou dont la température était primitivement la plus élevée, ou qui est ébranlée par le frottement dans une plus petite étendue, tend à prendre l'électricité négative. Ainsi, deux plaques de verre dont l'une est polie et l'autre dépolie prennent, par le frottement, la première l'électricité positive, la dernière l'électricité négative : ainsi, deux rubans identiques étant frottés en croix, celui qui n'est frotté que sur une petite étendue prend l'electricité négative. On conçoit, d'après cela, qu'on ne peut pas ranger les corps mauvais conducteurs dans un ordre tel que chaque corps soit toujours, par exemple, positif par rapport à ceux qui suivent, et négatif par rapport à ceux qui précèdent. On peut cependant établir 1° que le poil de chat vivant prend l'électricité positive avec toutes les substances connues; 2° que le verre poli prend toujours l'électricité positive, excepté avec le poil de chat et le mercure; 3° que le verre dépoli est positif avec les corps résineux, et négatif avec le drap, le papier, la main, le poil de chat; 4° que la cire d'Espagne est négative avec les métaux; 5° que les corps résineux sont toujours négatifs avec les corps non-résineux.

978. M. Delarive a fait des expériences sur le frottement des métaux, en employant les doigts secs, l'ivoire, la corne, le liége et différentes espèces de bois : il a trouvé que le rhodium, le platine, le palladium, l'or, le tellure, le cobalt, le nickel et l'antimoine prenaient toujours l'électricité négative; que l'argent, le cuivre, le laiton et l'étain, étaient presque toujours négatifs; que le plomb et le bismuth étaient toujours positifs, et que le fer et le zinc étaient tantôt positifs et tantôt négatifs. M. Delarive suppose que les métaux sont toujours négatifs, et que les variations qu'on observe proviennent de l'oxyde enlevé par le frottoir, parce qu'alors le frottement a lieu entre

Digitized by Google

l'oxyde et le métal. Il a aussi reconnu que la vitesse et la pression étaient sans influence.

979. En 1817, Wollaston avait annoncé qu'en plaçant une machine électrique sous une cloche dans laquelle on pouvait remplacer l'air par l'acide carbonique, dans ce dernier gaz il ne se dégageait pas d'électricité. En rapprochant ce fait de cette circonstance que les coussins des machines électriques doivent être enduits de matières facilement oxydables, pour produire de grands effets, on avait été conduit à regarder comme très-probable que l'électricité provenait d'une action chimique. Une découverte plus récente de M. Becquerel venait à l'appui de cette conjecture : ce savant a reconnu qu'en broyant certaines substances solides, on pouvait en séparer les éléments, et produire des actions chimiques. Ainsi, si on porphyrise dans un mortier d'agathe un cristal de mésotype (silicate double de soude et d'alumine), la poudre est alcaline, et elle cesse de l'être quand elle a été lavée avec de l'eau distillée. Toutes les laves sont dans le même cas : en broyant ensemble un cristal de sulfate de potasse et du carbonate de chaux, ou du sulfate de potasse et du carbonate de baryte, ces sels sont en partie décomposés.

980. De tous les faits que nous venons de rapporter on ne pouvait rien déduire de général, non-seulement sur la cause probable du développement de l'électricité par la pression et le frottement, mais même sur les principales circonstances nécessaires au développement de l'électricité : car il fallait pour cela connaître l'influence de la pression, de la vitesse et des autres circonstances, dans la production de l'électricité par le frottement ; il fallait chercher à rapprocher les circonstances qui accompagnent le développement de l'électricité par la pression et le frottement, pour déterminer en quoi diffèrent les effets produits par ces deux causes ; enfin, il fallait vérifier avec soin les expériences de Wollaston. J'ai essayé de résoudre ces questions, et je rapporterai sommairement les moyens que j'ai employés et les résultats auxquels je suis parvenu.

981. L'appareil que j'ai employé consistait (*fig.* 565) en un gros cylindre de verre *A*, qui avait été arrondi et poli au tour ; il était traversé par un axe en fer, mobile dans des coussinets fixes *CC*, montés sur des supports isolants. Un frottoir *D* en bois, ayant inférieurement la courbure du cylindre, et que l'on pouvait recouvrir de différentes lames flexibles, était garni de deux appendices *EE* logés dans les coulisses *FF;* à sa partie supérieure se trouvaient deux tiges métalliques *GG*, destinées à recevoir des poids *HH*. Sur une des faces du cylindre et à une petite distance était placé un peigne métallique *K*, fixé à un support isolé *I;* le peigne communiquait, par un fil recouvert de soie, avec une tige de cuivre *ab*, logée dans un tube de verre, et terminée en *b* par une boule sur laquelle était vissé un petit cylindre d'acier bien poli, terminé lui-même par une boule *c*, et autour duquel se trouvaient deux petites hélices en fils de cuivre, l'une fixe et l'autre mobile, auxquelles étaient fixées deux pailles terminées par deux boules de moelle de sureau. Sur le cylindre de verre se trouvait une douille en cuivre, fixée à une plaque de même métal *ef*, portant un cadran divisé ; enfin un écran *mn*, placé à plusieurs mètres, était percé d'un petit orifice dont le centre correspondait à l'axe de la tige *ab;* c'est par cet orifice qu'on observait la déviation du pendule mobile. Il était indispensable d'avoir un cylindre de verre parfaitement rond, afin que sa distance au peigne fût toujours la même pendant le mouvement, car sans cela le pendule aurait fait des oscillations continuelles. La nécessité de toutes les autres dispositions se comprendra facilement.

Je m'assurai d'abord que les indications de l'instrument étaient toujours les mêmes dans les mêmes circonstances ; j'examinai ensuite successivement l'influence des différentes circonstances qui se présentent dans le frottement, et j'obtins les résultats suivants.

Digitized by Google

982. *Influence du temps, la vitesse et la pression étant constantes.* En employant pour frottoirs le papier nu ou couvert de cuivre, d'étain, d'argent, d'or, l'étain en feuilles, la soie, le coton, le taffetas ciré, etc., à partir de l'origine du mouvement, la tension va en croissant pendant un certain temps, en général très-court, après lequel elle reste constante.

983. *Influence de la vitesse.* Pour observer l'influence de la vitesse, on tournait la manivelle de manière à lui faire faire une révolution dans huit, quatre, deux ou un battement d'une montre, et chaque vitesse était continuée pendant un certain temps. Il résulte des expériences faites avec tous les corps frottants sur des cylindres de verre, de résine et de taffetas ciré, que la tension électrique est indépendante de la vitesse, excepté pour certains corps, tels que la pluche de soie, le molleton, et en général les corps garnis de longs filaments, qui neutralisent au delà du contact une partie de l'électricité du cylindre d'autant plus grande que la vitesse est plus petite. Mais la permanence de tension, quelle que soit la vitesse, ne subsiste qu'à la condition que le cylindre n'est pas constamment déchargé, quand le frottoir n'est pas très-bon conducteur : car lorsqu'on décharge le cylindre par une frange métallique placée du côté opposé au peigne, la tension diminue avec la vitesse, et d'autant plus que le frottoir est plus mauvais conducteur. Ce phénomène s'explique facilement en considérant que, le cylindre étant constamment déchargé, l'électricité qui le recouvre provient uniquement de la dernière friction, et doit être égale à celle de signe contraire qui s'écoule dans le sol à travers le frottoir. Quand le frottoir est formé d'un corps bon conducteur, il laisse écouler dans le sol à chaque instant toute l'électricité qui peut se développer ; mais quand il est mauvais conducteur il n'en est plus ainsi, et il est facile de voir que la tension du cylindre, dans ce dernier cas, doit être plus petite que dans le premier, et diminuer avec la vitesse. Relativement à la quantité d'électricité développée, quand on fait varier la vitesse, il est évident que, la tension restant la même quand on décharge continuellement le cylindre par une frange métallique, la quantité d'électricité produite est proportionnelle à la vitesse ; mais je me suis assuré de l'exactitude de cette loi d'une autre manière. L'armure intérieure d'une bouteille de Leyde fut mise en communication avec le peigne, et une boule métallique communiquant avec le sol fut placée à une distance fixe de la boule de l'armure intérieure. Lorsqu'on fait tourner le cylindre avec une vitesse uniforme, la bouteille se décharge toujours après le même nombre de tours, quelle que soit la vitesse, quand le frottoir est bon conducteur ; mais quand il est mauvais conducteur, les décharges ont lieu après des nombres de tours qui augmentent avec la vitesse. Cette dernière anomalie s'explique facilement d'après ce que nous avons dit relativement à l'influence de la vitesse sur la tension, quand les corps sont mauvais conducteurs et qu'on décharge le cylindre.

Cette permanence de tension ne provient pas de ce que, la déviation du pendule mobile étant très-grande, elle n'éprouve que de faibles variations relativement aux changements de tension du cylindre : car, en augmentant le poids de la boule qui termine le pendule mobile, on peut rendre la déviation aussi petite qu'on veut, et toujours la déviation est indépendante de la vitesse. Elle ne provient pas d'un maximum de tension que prendrait le conducteur, et qu'il conserverait sensiblement malgré les variations de tension du cylindre, à cause de la perte par l'air : car, en éloignant les pointes du cylindre de verre, on diminue la tension autant qu'on veut, et toujours la permanence subsiste avec les variations de vitesse. Elle ne provient pas non plus d'un maximum de tension qui s'établirait sur le cylindre pour les petites vitesses, et subsisterait pour les grandes à cause de la conductibilité de l'air et des supports, d'abord parce que la tension est très-différente pour les différents corps, et ensuite

Digitized by Google

parce que, si on supposait un accroissement de tension dû à la vitesse, la perte par les supports, qui est très-faible, à cause de la grande étendue de verre couvert de gomme laque qui se trouve de chaque côté de la zone qui passe sous le frottoir, devrait toujours laisser subsister un accroissement de tension.

984. *Influence de la pression.* Dans les expériences relatives à la pression, on a donné au cylindre mobile un mouvement de rotation uniforme longtemps prolongé, et on a fait varier progressivement la charge du frottoir de 1 k., 2 à 10 k., 2, en laissant entre les charges l'intervalle nécessaire pour que le pendule devienne bien stationnaire. Je m'étais assuré d'avance qu'on obtenait les mêmes résultats en arrêtant le mouvement à chaque nouvelle charge; mais, la première méthode exigeant beaucoup moins de temps, je l'ai préférée. Les frottoirs employés avaient 40 et 144 centimètres carrés. J'ai opéré avec des cylindres mobiles en verre, en résine nue ou enveloppée de taffetas ciré ou de satin, et avec des frottoirs garnis de papier couvert de différents métaux, avec des feuilles d'étain, de plomb, avec diverses étoffes de soie, de coton et de lin, et avec différents cuirs. Il résulte de toutes ces expériences :

1° Que, pour tous les corps que je viens de citer, la déviation, quoique très-différente pour chaque corps, reste sensiblement permanente pour chacun d'eux, quelle que soit la pression, que le cylindre soit ou non constamment déchargé par une frange métallique. Seulement, pour quelques uns, la permanence ne commence à s'établir qu'à partir des charges 2k.,2 ou 4 k.,2. Ainsi, pour la même vitesse, la quantité d'électricité développée est indépendante de la pression. Par les mêmes raisons que nous avons exposées en parlant de l'influence de la vitesse, la permanence de tension ne provient ni de la grande déviation des pendules, ni d'un maximum de tension qui s'établirait dans le conducteur ou sur le cylindre.

2° Que tous ces corps présentent quelquefois des variations de déviations correspondantes aux variations de pression. Ces variations sont en général très-petites; mais elles correspondent quelquefois, pour un accroissement de pression de 4. k à 10 k., à une variation d'électricité de 1/10. Ces anomalies, quand elles existent, sont toujours de signes contraires pour les corps bons conducteurs et les corps mauvais conducteurs; pour les premiers, frottant sur le verre, il y a décroissement.

D'après ces résultats, j'ai dû regarder comme probable que la pression, du moins à partir d'une certaine limite, était sans influence sur l'électricité développée, et que les petites anomalies qu'on rencontre quelquefois provenaient de quelques circonstances particulières produites par l'accroissement de pression. Mais, pour acquérir une certitude complète, il fallait faire varier la pression dans de plus grandes limites, et découvrir la cause des anomalies.

On ne pouvait pas, sans compromettre la solidité de l'appareil, augmenter de beaucoup les charges; mais on pouvait produire un accroissement de pression, en diminuant l'étendue de la surface inférieure du frottoir : c'est ce que j'ai fait, et j'ai reconnu qu'un accroissement de pression de 1 à 30 était encore sans influence.

Quant aux anomalies dont il a été question, je soupçonnais qu'elles pouvaient être le résultat de la chaleur dégagée. Pour vérifier cette conjecture, j'ai pris une tige de verre que j'ai frottée avec différents corps, d'abord sans développer de chaleur sensible, ensuite de manière à rendre le tube brûlant, et j'ai déterminé dans quel sens variait l'électricité développée sur le verre, en approchant la tige d'un électromètre à lames d'or, chargé d'électricité de signe contraire, jusqu'à ce que les lames fussent revenues au parallélisme. La distance à laquelle la tige de verre devait être amenée pour produire cet effet permettait d'apprécier facilement s'il y avait eu augmentation ou diminution. J'ai trouvé ainsi que, par l'accroissement simultané de la vitesse, de la pression et de la chaleur, le verre manifestait un accroissement d'électricité avec

Digitized by Google

tous les corps mauvais conducteurs, et un décroissement avec les corps bons conducteurs, qui, pour quelques uns, allait jusqu'au changement de signe. Le changement de signe s'obtient très-facilement quand on frotte sur le verre du plomb laminé.

Ainsi, ces variations sont dans le même sens que les anomalies qui nous occupent; or on ne peut pas admettre que les variations de l'état électrique de la tige de verre proviennent des accroissements de vitesse et de pression, car on ne pourrait pas expliquer comment les corps bons et mauvais conducteurs agissent en sens contraire; d'ailleurs, des expériences nombreuses démontrent que la vitesse et la pression sont sans influence : ainsi, on ne peut attribuer ces variations et les anomalies en question qu'à la chaleur développée par le frottement. Il est d'ailleurs facile de se rendre compte de sa manière d'agir. En effet, la chaleur dégagée par le frottement ne doit pas se répartir également entre les deux corps; celui qui est le meilleur conducteur doit nécessairement prendre une température inférieure à celle de l'autre. Ainsi, le verre doit prendre une tendance négative avec les corps bons conducteurs et une tendance positive avec ceux qui sont plus mauvais conducteurs que lui.

Le frottement dégageant toujours de la chaleur, et en quantité croissante avec la vitesse et la pression, il semble que l'influence de la chaleur devrait toujours se manifester par les variations de vitesse et de pression. Mais il faut remarquer 1° que dans l'appareil dont je me suis servi, et pour les limites de vitesse et de pression qui ont été employées, l'accroissement de température du verre, à quelques exceptions près, n'a jamais été que d'un petit nombre de degrés, ce dont je me suis assuré par des expériences directes; 2° que ce n'est pas la température commune des deux corps qui agit pour faire varier la tension électrique sur l'un d'eux, mais seulement la différence de leur température. Ainsi cette influence a dû être, en général, très-petite; mais il m'a été impossible de découvrir les circonstances physiques qui, dans certains cas, l'ont rendue sensible.

Certains corps mauvais conducteurs, principalement les étoffes plucheuses de coton, de laine et de soie, présentent encore une anomalie facile a expliquer : lorsqu'on décharge constamment le cylindre, la déviation augmente avec la pression, et d'une quantité assez notable. Cet effet provient très-probablement de ce que la pression augmente le nombre des points de contact, et rapproche les fibres de ces substances, circonstances qui, en augmentant la faculté conductrice, permettent un plus grand développement d'électricité.

Jusqu'ici je n'ai parlé que de la pression totale exercée sur la surface en contact avec le cylindre; mais jamais le contact réel n'existe que sur une partie de l'étendue du contact apparent, et ce sont les points qui se touchent qui supportent la pression, qui frottent, et qui produisent l'électricité. Or, le nombre et l'étendue de ces points doit nécessairement augmenter avec la pression, et il est facile de voir que, si la somme de leurs surfaces augmentait proportionnellement à sa charge, la pression éprouvée par une même étendue en contact réel resterait constante, quelle que fût la charge des frottoirs; et, par conséquent, la loi que nous avons déduite de l'expérience n'aurait rien de réel. Mais il n'en est pas ainsi. D'abord, on ne comprend pas la possibilité de l'existence, pour tous les corps, de la loi que je viens de supposer. En outre, dans toutes mes expériences, les frottoirs étaient disposés de manière que l'étendue du contact apparent n'augmentait pas sensiblement avec la charge : ainsi l'accroissement des points de contact ne pouvait provenir que de l'affaissement des aspérités. Or il est facile de reconnaître, à l'aide d'un prisme (1), que, pour tous les

(1) Lorsque, l'œil étant placé en O (*fig.* 565 *A*), on regarde à travers un prisme ABC, en rapprochant l'œil de la base AB du prisme, il existe une position au delà de laquelle les rayons de lumière

Digitized by Google

corps, et entre les limites de pression des expériences, le nombre et l'étendue des points de contact augmentent bien avec la pression, mais, en général, d'une quantité très-petite. Ainsi, l'augmentation du nombre des points de contact par l'accroissement de la charge rend seulement moins rapide l'accroissement de pression de chacun d'eux; mais cet accroissement ne subsiste pas moins.

Il faut encore remarquer que les points qui sont en contact réel supportent non-seulement la charge des frottoirs, mais encore la pression de l'air; et il faut examiner si les poids additionnels ne sont pas toujours très-petits par rapport à la pression de l'air : car, s'il en était ainsi, en admettant même que la pression eût une influence dans la production de l'électricité, les variations dues aux charges seraient insensibles. Lorsqu'on emploie de très-grands frottoirs, on peut croire qu'il en est ainsi; mais, pour des frottoirs à très-petite surface, en admettant que le contact réel soit établi sur toute la surface du contact apparent, ce qui est le cas le plus défavorable, il est facile de reconnaître que la pression de l'air est, au contraire, très-petite par rapport à celle qui résulte de la charge.

Ainsi cette loi, déduite de l'expérience, que la pression est sans influence sur le développement de l'électricité, subsiste encore quand on considère la pression supportée par les points en contact réel, et qu'on tient compte de l'intervention de la pression de l'air.

985. *Influence de la largeur du frottoir.* Dans les expériences qui ont eu pour objet l'influence et la largeur des surfaces en contact, j'ai employé des frottoirs dont les surfaces inférieures avaient même longueur, et dont les largeurs étaient à peu près dans le rapport de 1 à 4; tous les corps, avec ces deux frottoirs, ont donné sensiblement la même déviation.

Pour vérifier les résultats de ces expériences, je me suis servi d'un même frottoir, en laissant dépasser la feuille de manière à l'appliquer sur le verre au delà du frottoir sur une étendue plus ou moins considérable, et en relevant l'extrémité de la lame contre le frottoir (*fig.* 563 *B*). Lorsque le système des pointes communiquant avec le conducteur était placé au-dessous du cylindre, le contact pouvait être prolongé à une grande distance, sans que la déviation fût changée; et pour cela il n'était pas nécessaire que le contact fût continu : on pouvait relever la lame par un pli, et mettre un intervalle de plusieurs centimètres entre le frottoir et la partie du prolongement de la lame en contact avec le verre, sans que la déviation fût changée (*fig.* 563 *C*). Cette expérience est importante, car elle démontre mieux que toutes celles que nous avons rapportées que la pression et l'étendue des surfaces en contact sont sans influence. En effet, j'ai démontré que la charge électrique du cylindre au delà de la lame provient entièrement du dernier contact; or, cette surface en contact peut être très-petite et la seule force directe qui la presse provient de l'élasticité de la feuille.

Mais quand la feuille qui passe sous le frottoir n'est pas repliée sur elle-même, qu'elle est entièrement libre, et que son extrémité touche le verre, la déviation décroît avec l'étendue du contact, excepté pour le taffetas ciré. Ces phénomènes s'expliquent facilement.

986. *Influence de la courbure.* Lorsque la lame qui passe sous le frottoir est formée d'une substance qui conduit bien l'électricité, la courbure de la lame au delà

entrés par AB ne peuvent pas sortir par AC : alors l'œil ne reçoit que les rayons qui pénètrent dans le prisme par la face BC, et qui après s'être réfléchis sur AB, sortent par AC. L'angle $MO'N$ où commence la réflexion totale sur AB, dépend du corps qui touche la surface AB; il est plus grand quand le corps est solide que quand c'est l'air; alors quand on place un corps sur AB, les points de contact se voient comme des taches dans un miroir : par conséquent, si on exerce sur le corps des pressions croissantes, il sera facile de suivre l'accroissement du nombre et de l'étendue des points de contact.

Digitized by Google

du contact a une influence sensible sur la tension électrique du cylindre. Lorsque les pointes du conducteur sont placées sous le cylindre, j'ai reconnu que, pour le papier cuivré et des rayons de courbures de 27, 14, 7 et 3, 5 millimètres, les déviations étaient de 22, 20, 18 et 17.

Il n'est pas douteux que cette influence de la courbure de la lame au delà du contact provient de ce que cette partie courbe s'électrise par l'influence du cylindre, et que sa tension augmente la quantité d'électricité neutre qui se reforme sur la ligne de séparation des deux surfaces. On voit alors pourquoi l'influence dont il s'agit ne se reproduit point avec les corps mauvais conducteurs, et pourquoi, quand elle existe, elle augmente à mesure que le rayon de courbure diminue.

987. *Influence de l'épaisseur.* Les expériences relatives à l'influence de l'épaisseur ont été faites sur l'étain, le plomb, le satin, la peau, le taffetas ciré, le papier. Pour l'étain, l'épaisseur a varié de 1 à 40, pour les autres corps, de 1 à 9; pour le premier corps seulement la plus petite épaisseur était extrêmement faible. Il résulte de toutes mes expériences que l'épaisseur du corps est sans influence; mais quand on décharge constamment le cylindre, et qu'on emploie des corps mauvais conducteurs, la déviation décroît à mesure que la vitesse augmente, et d'autant plus que l'épaisseur du corps est plus grande: la raison en est évidente d'après ce que nous avons dit précédemment.

988. *Influence de la nature du frottement.* On distingue deux espèces de frottement, celui de glissement et celui de roulement. Jusqu'ici nous n'avons parlé que du premier; il était important d'examiner les effets produits par le dernier.

Dans les expériences faites à ce sujet je me suis servi d'un cylindre de cuivre creux, garni à sa surface de plusieurs cuirs destinés à lui permettre de s'appliquer sur le cylindre de la machine dans une certaine étendue. Dans la direction de son axe se trouvaient deux tiges qui s'engageaient entre les guides des frottoirs, et qui étaient destinées à recevoir des poids qu'on fixait avec des écrous. En rendant le cylindre immobile, on produisait le frottement de glissement; en le laissant libre, on obtenait le frottement de roulement.

Ces expériences ont présenté une difficulté. Le cylindre roulant, à cause des inégalités de sa surface, qu'il est presque impossible d'éviter, tend à se séparer du cylindre de verre, et d'autant plus que la vitesse est plus grande. J'essayai d'employer des ressorts; mais la rotation s'arrêtait par intermittence: alors je me suis servi des mains pour maintenir le cylindre appliqué sur le verre. C'est ainsi qu'ont été faites toutes les expériences dont je vais rapporter seulement les résultats.

Dans le frottement de roulement, les variations de vitesse produisent les mêmes effets qu'avec le frottement ordinaire: la déviation reste constante pour tous les corps à surface lisse, et augmente avec la vitesse pour les corps à surface plucheuse. De très-grandes variations de pression, au delà de celle qui est nécessaire pour établir le contact, ne produisent également aucune variation sensible dans la déviation: ainsi, dans le frottement de roulement comme dans le frottement de glissement, la vitesse et la pression sont sans influence sur la tension de l'électricité développée.

Relativement à la comparaison des effets produits sur les mêmes corps par les deux espèces de frottement, voici les résultats que j'ai obtenus.

Les métaux en lames minces, le papier et les peaux lisses produisent exactement la même quantité d'électricité par les deux espèces de frottement.

Le satin du côté non glacé, donne les mêmes résultats que les corps précédents; mais, du côté de la face satinée, le roulement produit plus que la friction. J'ai fait voir dans mon mémoire que cet effet tenait à la faible conductibilité de la face lisse du satin.

Digitized by Google

Le molleton produit sur le verre par le roulement une plus grande déviation que par la friction. Cette différence provient très-probablement de l'action des filaments qui se trouvent au delà du contact, action qui est beaucoup plus grande dans le frottement de glissement que dans le frottement de roulement.

Relativement au taffetas ciré, il y a deux cas à considérer, celui où le taffetas est très-sec et n'adhère pas aux corps, et celui où il est glutineux. Dans le premier cas, il produit le même effet que la peau et les métaux en lame mince, la déviation est la même par les deux frottements; dans le second cas, avec le verre poli, l'électricité du cylindre change de signe avec le changement de frottement, ce qui devait être: car l'électricité produite par le frottement de roulement rentre évidemment dans le cas de l'électricité développée par la pression, seulement il y a continuité; avec le verre dépoli et la résine, il y a seulement diminution de déviation. Mais, comme l'adhésion ne se manifeste que par le roulement, il est très-probable que ce n'est pas le mode de frottement qui produit la diminution de tension et le changement de signe, mais seulement la différence de l'action moléculaire qui se produit dans les deux cas, et que l'adhésion agit toujours en donnant une tendance positive au corps glutineux.

989. Il résulte de tout ce que nous venons de dire que, dans le développement de l'électricité par le frottement de glissement ou de roulement, la pression et la vitesse sont sans influence sur la tension; que la quantité d'électricité est proportionnelle à la vitesse, quelle que soit la pression; et que toutes les anomalies qui peuvent se présenter s'expliquent facilement, ou par les aspérités des surfaces, ou par l'imparfaite conductibilité des frottoirs, ou par les variations de forme que la pression fait éprouver aux corps, ou enfin par la chaleur développée, ou par l'adhérence.

990. Remarquons maintenant que le frottement de roulement n'est autre chose qu'une pression et une séparation continues des surfaces mises en contact: ainsi on aurait dû obtenir par ce moyen les mêmes résultats que M. Becquerel a obtenus par la pression. Comment se fait-il qu'ils soient si différents en apparence? L'explication est facile. M. Becquerel n'a opéré que sur des corps très-élastiques et très-compressibles, tels que du liége, de la moelle de sureau, et il n'a pas opéré sous de très-grandes pressions: alors les accroissements de pression ont toujours été accompagnés d'un accroissement dans le nombre et l'étendue des points de contact; c'est à cette circonstance qu'est dû l'accroissement d'électricité qu'il a observé. Dans mes expériences, au contraire, j'ai opéré sur des corps peu compressibles, tels que du papier nu ou couvert de différents métaux, et je n'ai reconnu la permanence de tension qu'au delà d'une certaine limite de charge, celle à laquelle l'accroissement du nombre des points de contact restait sensiblement constant. Cette explication n'est point une hypothèse: je me suis assuré par des expériences directes qu'il en est réellement ainsi.

En pressant du liége, de la moelle de sureau et du papier contre un prisme de verre (note, page 121), j'ai reconnu que, pour les premiers corps, le nombre des points de contact augmentait rapidement avec la pression jusqu'à une limite très-éloignée, et que, pour le dernier corps, dans les limites de pression où la tension reste constante, l'accroissement du nombre des points de contact était insensible. Ainsi je suis convaincu que l'accroissement d'électricité que M. Becquerel a obtenu par l'accroissement de pression provient uniquement de l'accroissement du nombre des points de contact, et que, si cet habile physicien avait opéré sous de plus grandes pressions, l'accroissement d'électricité qu'il a observé aurait fini par disparaître. Au surplus, comme il est impossible de ne pas admettre que, dans les corps sur lesquels M. Becquerel a opéré, le nombre des points de contact a augmenté avec la pression,

Digitized by Google

il est évident que la pression réelle supportée par ces points diminuait avec leur nombre, et que, pour établir une loi quelconque entre la pression et l'électricité développée, il aurait fallu réduire les pressions à la même étendue de surface réellement en contact.

991. *Influence de la nature du gaz environnant.* Avant de répéter l'expérience de Wollaston, j'ai dû commencer par m'assurer si, dans les mêmes circonstances, l'électricité se dissipait de la même manière dans l'air et dans l'acide carbonique: car, s'il n'en était pas ainsi, il est évident que les expériences sur la tension et la quantité d'electricité développée dans les mêmes circonstances, dans l'air et dans l'acide carbonique, ne pourraient conduire à rien de positif. Pour cela, j'ai fait construire deux balances de Coulomb aussi égales que possible. J'ai pris les fils de suspension dans un seul fil, que j'ai coupé en deux parties égales. Les corps de suspension et les leviers mobiles avaient aussi les mêmes poids et les mêmes dimensions, ainsi que les boules intérieures et extérieures du conducteur. Pour vérifier leur identité, je chargeai les boules extérieures en les mettant en contact avec deux boules égales isolées avec de la gomme laque, dont une seule avait été électrisée, et qui avaient été mises en contact entre elles: les déviations ont été trouvées égales au premier instant et à des époques quelconques. Alors j'ai fait passer un courant d'air sec dans un des vases, et un courant d'acide carbonique également desséché dans l'autre, j'ai chargé les boules extérieures de la même quantité d'électricité, et j'ai reconnu que les déviations étaient à chaque instant sensiblement les mêmes, et que, par conséquent, la déperdition de l'électricité libre était sensiblement la même dans l'air et dans l'acide carbonique. Cette vérification faite, j'ai logé une petite machine électrique sous une cloche, le système des pointes communiquant avec un électromètre très-sensible à déviation constante (943), et j'ai rempli successivement la cloche d'air et d'acide carbonique desséchés à travers un tube plein de chlorure de calcium. J'ai obtenu exactement la même déviation, que le verre fût ou non déchargé par une frange métallique avant de passer sous le frottoir, le frottoir étant recouvert d'une feuille de papier cuivré. Ainsi, le fait annoncé par Wollaston est inexact; il est probable que, dans son expérience, ce célèbre physicien n'aura pas pris les précautions convenables pour dessécher complétement l'acide carbonique.

992. Nous pouvons maintenant, à l'aide de ce qui précède, résumer en peu de mots les circonstances qui produisent le dégagement de l'électricité par le frottement, et celles qui modifient ce dégagement.

1° Tous les corps sont électriques par le frottement.

2° Dans le dégagement de l'électricité par le frottement ou la pression, il n'y a que deux conditions importantes à remplir, contact et séparation: car la vitesse, la pression et le mode de frottement étant sans influence, la nature, la direction et l'intensité de l'ébranlement des molécules sont sans influence.

D'après cela, on doit regarder comme très-probable que l'électricité se développe par le fait seul du contact, et que la séparation des deux corps ne fait que mettre les électricités en liberté.

V. *Électricité atmosphérique.*

993. Il existe une grande analogie entre les effets produits par la foudre et ceux qui proviennent des décharges des grandes batteries électriques: les décharges électriques, comme la foudre, sont accompagnées d'une vive lumière qui apparaît sous la même forme; l'électricité produit, comme la foudre, la fusion des métaux, l'inflammation des matières combustibles, et la mort des animaux. Les pointes des corps

Digitized by Google

conducteurs voisins des nuages orageux deviennent lumineuses pendant la nuit, comme les pointes métalliques voisines du conducteur d'une machine électrique : c'est ce phénomène qu'on désignait autrefois sous les noms de *feux Saint Elme*, ou de *Castor et Pollux*.

Mais ce ne fut qu'en 1752 que Franklin constata l'identité de la foudre et de l'électricité par des expériences que nous allons rapporter. Il lança contre un nuage orageux un cerf-volant armé d'une pointe et retenu par une ficelle : d'abord le fil ne donna aucun indice d'électricité, parce qu'il n'était pas assez bon conducteur ; mais, une légère pluie étant survenue, il devint bon conducteur, et Franklin parvint à en tirer des étincelles. Il plaça ensuite sur sa maison une barre de fer isolée, terminée supérieurement par une pointe, et à sa partie inférieure par un carillon électrique (918) : le bruit du carillon annonça plusieurs fois que la barre était chargée d'électricité. Pendant que cet homme célèbre se livrait, à Philadelphie, à ces recherches importantes, il avait communiqué ses idées aux physiciens d'Europe, en les engageant à faire des essais.

Dalibard, physicien français, fit construire à Marly-la-Ville, près de Paris, une cabane sur laquelle il plaça une barre de fer terminée supérieurement par une pointe et isolée inférieurement : après le passage d'un nuage orageux, la barre donnait des étincelles à l'approche d'un corps conducteur. Canton, pour obvier au défaut d'isolement de la barre occasionné par la pluie, qui mouillait le support isolant, le couvrit d'un chapeau : alors le conducteur conserva l'électricité qu'il avait acquise, et il reconnut que les nuages étaient chargés tantôt d'électricité vitrée, tantôt d'électricité résineuse, et que la pluie et la neige électrisaient aussi la barre.

M. de Romas, en 1759, fit l'expérience du cerf-volant : il entrelaça la corde d'un fil de fer, il attacha à son extrémité un cordon de soie qui l'isolait parfaitement ; et, pour se mettre à l'abri d'une décharge trop violente, il tirait les étincelles au moyen d'un excitateur supporté par des manches de verre de deux pieds de long, dont une des extrémités communiquait avec le sol. L'appareil ayant été dirigé vers un nuage orageux, M. de Romas parvint à tirer des étincelles qui avaient plus de dix pieds de long, et qui faisaient un bruit analogue à des coups de pistolet. On voit d'après cela combien la grande conductibilité de la corde rendait importantes les précautions que nous venons de détailler, et quel danger M. de Romas aurait couru s'il avait reçu de semblables commotions.

994. Il résulte de ce qui précède que les nuages orageux sont électrisés, et qu'ils le sont quelquefois fortement. Il est facile, d'après cela, de concevoir la cause des éclairs et de la foudre. Lorsque deux nuages sont tous deux chargés d'électricité contraire, ou que seulement l'un deux est électrisé, l'autre le devient par influence ; et s'ils se trouvent à une distance assez petite pour que les électricités puissent les abandonner, l'explosion qui en résulte est accompagnée d'une vive lumière, qui est l'éclair, et le bruit qui l'accompagne produit le tonnerre. La foudre n'est autre chose que la décharge d'un nuage orageux sur la surface de la terre.

L'éclair est toujours plié en zigzag, comme les étincelles électriques que l'on obtient avec les machines : cette forme des étincelles et de l'éclair provient probablement de ce que le flux électrique comprime l'air en avant, et que, la compression ayant acquis une certaine limite, le flux se porte latéralement où il éprouve moins de résistance ; les grands crochets peuvent aussi résulter de ce que la décharge a lieu successivement sur des points plus conducteurs, qui peuvent être disposés d'une manière quelconque, par exemple sur de petits nuages. Le bruit du tonnerre ne peut pas provenir, comme on l'avait supposé, de la réflexion du son contre les nuages, car en mer le bruit du canon n'est jamais répété, quels que soient le nombre

Digitized by Google

et la disposition des nuages. Le bruit du tonnerre provient de la série des bruits qui se manifestent dans les principaux centres d'ébranlement; les coups sont successifs et analogues à un roulement de tambour lorsque l'observateur est à des distances différentes des centres d'explosion, et les intervalles sont mesurés par le temps que le son met à parcourir les différences des distances; mais on n'entend qu'un seul coup lorsque l'observateur est sensiblement à la même distance des points où les chocs sont produits. Les effets produits par la foudre sont ou des mouvements de transport, ou des effets de chaleur, ou des actions chimiques, analogues aux effets que nous produisons avec nos puissantes batteries électriques, mais qui sont bien autrement énergiques.

995. La foudre tombe en général de préférence sur les corps les plus élevés, tels que les clochers, les arbres; mais on conçoit que la faculté conductrice doit exercer aussi une grande influence. Dans les plaines, la foudre tombe de préférence sur les arbres, et surtout sur ceux qui sont très-élevés, parce que le bois en végétation est bon conducteur : ainsi les arbres sont des abris dangereux pendant l'orage.

Les clochers sont aussi des abris dangereux dans les temps d'orage quand ils ne sont point garnis de paratonnerres, surtout à cause du préjugé si généralement répandu de sonner les cloches : car un grand nombre d'expériences concourent à prouver que la foudre tombe plus fréquemment sur les clochers où l'on sonne que sur ceux où l'on ne sonne pas. En 1718, M. Deslande fit savoir à l'Académie que, dans la nuit du 14 au 15 avril, la foudre était tombée en Bretagne sur vingt-quatre églises, que ces églises étaient précisément celles où l'on sonnait, et que la foudre avait épargné celles où l'on ne sonnait pas.

996. Lorsqu'il se trouve au-dessous du sol et à une petite distance, de grandes masses d'eau ou de grandes masses métalliques, elles s'électrisent fortement par influence, et peuvent déterminer la chute de la foudre sur des lieux très-bas. Il est très-probable que c'est à ces dernières circonstances qu'est due la formation des tubes vitrifiés, désignés sous le nom de *tubes fulminaires*, qui ont été trouvés dans les plaines de la Silésie, de la Prusse, du Cumberland et au Brésil. Ces tubes, qui n'ont que quelques millimètres de diamètre intérieur, ont souvent 2 pouces de diamètre extérieur, et quelques-uns 20 à 30 pieds de longueur. Ces tubes sont enfoncés dans le sable dans des directions diversement inclinées; leur surface intérieure est complétement vitrifiée, et leur surface extérieure formée de grains de sable seulement agglutinés; il est très-probable que ces tubes ont été formés par le passage de la foudre à travers le sable où ils ont été trouvés. C'est d'ailleurs ce que MM. Savart et Hachette ont mis hors de doute : en faisant passer une forte décharge électrique à travers du verre en poudre, ils ont obtenu de petits tubes formés de poudre de verre agglomérée.

997. Quand la foudre pénètre dans le corps des animaux, elle détermine des lésions dans les organes et principalement dans le système vasculaire; c'est à cause de ces lésions que la putréfaction se manifeste très-promptement. On attribue aux orages l'acescence du lait et une plus prompte corruption des chairs; mais la température élevée de l'air dans les orages pourrait bien être la cause unique de ces phénomènes. La foudre rend magnétiques les barres de fer sur lesquelles elle passe et change souvent les pôles des aiguilles aimantées; ce sont des faits qu'on produit aussi directement par des décharges électriques.

998. Fusinieri a reconnu des traces de soufre aux extrémités des racines d'un peuplier par lesquelles la foudre était sortie; M. Boussingault a reconnu de l'oxyde de fer sur des arbres foudroyés, et une matière charbonneuse sur des roches cyanitiques; s'il était démontré que la foudre n'avait point traversé avant d'autres corps d'où ces dépôts auraient pu être entraînés, il faudrait admettre que ces

Digitized by Google

substances étaient dans la foudre, et il serait bien difficile d'en comprendre l'origine.

999. La foudre, en traversant l'air, y produit de l'acide nitrique par la combustion de l'azote : c'est probablement là l'origine des nitrières naturelles ; aussi M. Boussingault a observé aux environs de Rio Bamba que le nitre se forme de préférence dans les lieux où les orages sont fréquents.

1000. *Choc en retour.* La foudre produit encore un phénomène particulier connu sous le nom de *choc en retour*, et qui consiste en ce que des hommes et des animaux éprouvent de violentes commotions, et quelquefois meurent subitement, à l'instant où la foudre éclate à un autre point qui peut être très-éloigné. Ce phénomène s'explique d'une manière très-simple. En effet, soit *ABC* (*fig.* 566) un nuage chargé d'électricité que je suppose positive : les points de la surface du sol qui correspondent aux points *A* et *C* seront électrisés par influence ; si l'explosion a lieu au point *A*, la partie du sol correspondante au point *C* rentrera brusquement à l'état naturel par le retour de l'électricité positive qui avait été refoulée dans le sol et y était retenue par l'action de l'électricité du nuage, et ce retour subit devra nécessairement produire de violentes commotions dans les êtres organisés qui se trouveront au point *C*. On peut mettre en évidence l'effet du choc en retour par l'expérience suivante. On place à une certaine distance d'une machine électrique un conducteur garni d'un électromètre : ce dernier s'électrise par influence, ce qu'on reconnaît à la déviation du pendule, et la recomposition des fluides qui a lieu toutes les fois qu'on décharge la machine produit dans le pendule un mouvement très-sensible ; en remplaçant l'électroscope par une grenouille écorchée, elle éprouve de vives agitations quand on tire une étincelle de la machine. Le choc en retour ne produit jamais les effets de transport et de chaleur qui accompagnent toujours la chute de la foudre sur les corps qu'elle frappe directement.

1001. *De la grêle.* Parmi les phénomènes qui accompagnent les orages, il en est un dont nous n'avons point encore parlé, et qui produit souvent de terribles effets, c'est la grêle. La grêle se forme, dans nos climats, au printemps et en été, aux heures les plus chaudes de la journée ; elle tombe rarement pendant la nuit. La grêle précède les pluies d'orage, les accompagne quelquefois, mais les suit rarement ; les nuages qui versent la grêle sont en général peu élevés, d'un gris cendré qui leur est propre ; leurs bords sont échancrés. Les grêlons sont formés d'un noyau de neige environné de plusieurs couches concentriques de glace.

On avait supposé que la grêle devait son origine à de l'eau de pluie dont les gouttes s'étaient congelées à une grande hauteur, et qui, dans leur chute, rencontraient de nouvelles gouttes liquides dont les molécules congelées s'arrangeaient autour d'elles par des couches concentriques, et augmentaient leur volume ; mais, comme la grêle ne se forme souvent qu'à une petite hauteur, on ne peut pas admettre que, dans le petit espace qu'elle parcourt, les grains puissent acquérir un poids qui va souvent jusqu'à plus de 50 grammes. M. Mattenci affirme en avoir vu du poids de 1 livre et demie, 750 grammes. Volta a expliqué l'accroissement de volume des grêlons de la manière suivante. Il suppose deux nuages chargés d'électricités contraires, voisins l'un de l'autre, et dont le plus élevé contient de petits grains de grêle provenant de la congélation subite de la vapeur qu'il renfermait : la grêle tendra à tomber en vertu de son poids, et sera repoussée par le nuage inférieur aussitôt qu'elle en aura partagé l'électricité ; le nuage supérieur l'attirera et la repoussera de la même manière, et, dans ce trajet réitéré d'un nuage à l'autre, les grains de grêle, rencontrant de la vapeur aqueuse, la condensent à leur surface, et augmentent de volume par couches concentriques, jusqu'à ce que l'action de la pesanteur les fasse tomber. Un fait qui vient à l'appui de cette explication consiste en ce que la chute

Digitized by Google

de la grêle est ordinairement précédée par un bruit semblable à celui que produirait le choc de corps durs agités par des mouvements rapides. Mais on ne conçoit pas pourquoi l'attraction, qui est assez puissante pour faire mouvoir les grêlons, ne rapprocherait pas les nuages, et cette explication n'est point admise. On peut dire que tout ce qu'on sait maintenant, c'est qu'il est très-probable que la formation de la grêle est due à des phénomènes électriques.

1002. *Des trombes.* Une trombe est un nuage en colonne à peu près verticale, assez ordinairement évasé par le haut, où il se confond avec d'autres nuages auxquels il paraît suspendu, et communément terminé par le bas en pointe plus ou moins rapprochée de la terre. Ce nuage lance tout autour de lui à des distances considérables une pluie abondante, souvent mêlée de grêle; l'air qui l'environne est dans une grande agitation. Il déracine les arbres; renverse les édifices, et entraîne tout ce qui ne présente pas une très-grande résistance; enfin, lorsqu'une trombe passe au-dessus de l'eau, le liquide est soulevé dans la trombe comme s'il était aspiré. C'est probablement à ce dernier phénomène que sont dues les pluies de crapauds, qui ont été trop souvent observées pour qu'il soit permis de nier leur existence. Lorsqu'une trombe plonge dans la mer par sa partie inférieure, et qu'elle est traversée par un boulet de canon, ordinairement elle se divise : la partie inférieure disparaît, et la partie supérieure reste suspendue aux nuages. Les phénomènes qui se produisent dans les trombes, ainsi que les circonstances qui les produisent, sont complétement inconnus.

Dans nos climats, les orages ont principalement lieu en été; entre les tropiques, la saison des orages commence précisément à l'époque où le soleil approche du zénith (M. Boussingault).

1003. *Électricité de l'air.* Non-seulement les nuages sont souvent chargés d'électricité, mais l'air atmosphérique l'est aussi, même dans les jours sereins, du moins dans nos climats; dans les mers polaires il n'est jamais électrisé, et il n'y a jamais d'orages (Scoresby). L'appareil dont on se sert pour reconnaître l'électricité de l'air est composé d'un électroscope ordinaire, surmonté d'une tige métallique terminée par une pointe ou par une petite lampe : l'air raréfié devenant meilleur conducteur, l'instrument se charge plus facilement (Volta); mais comme la combustion même dégage de l'électricité, il ne faut pas confondre l'électricité qui résulte de cette cause avec celle qui provient de l'atmosphère. Pour cela, on peut établir la communication entre la tige et l'électromètre par un tube de verre rempli d'eau distillée, qui possède une conductibilité suffisante pour transmettre l'électricité de l'air, mais insuffisante pour transmettre celle de la combustion. Pour obtenir l'électricité de l'air à une grande hauteur, on peut se servir d'une flèche fixée à un fil métallique dont l'extrémité se termine par un anneau très-large passé dans la tige de l'électromètre : le fil ne se détache de l'instrument que quand il a été complétement développé par le mouvement de la flèche. Dans les observatoires on se sert d'une tige de bois verticale de 6 à 7 mètres de hauteur, environnée de plusieurs fils métalliques, isolée dans toute son étendue et supportée par un cylindre de verre enduit de gomme laque; une tige communiquant avec un puits se termine supérieurement par un timbre placé à quelques centimètres des fils métalliques, et dans l'intervalle se trouve une boule métallique suspendue à un fil de soie : le bruit avertit que la tension de la tige a acquis une certaine énergie, et le mouvement de la boule la décharge. Un électromètre est en communication permanente avec la tige, et on peut à volonté établir aussi une communication permanente entre la tige et la tringle qui descend dans le sol. Mais les indications de l'électromètre sont loin de présenter une complète certitude, car nous verrons bientôt que l'air et la terre possèdent des électricités de signes contraires; et, comme l'électricité de l'air agit directement pour écarter les pailles, et que celle de

Digitized by Google

la terre agit par influence, toutes deux concourent à augmenter la divergence. Il faudrait, à côté de l'instrument atmosphérique, en avoir un autre qui ne serait soumis qu'à l'influence de la terre, et il suffirait pour cela qu'il n'eût point de tige, et qu'il ne fût pas élevé au-dessus du sol à plus de 2 ou 3 pieds.

Il résulte des nombreuses expériences faites par MM. Saussure, Biot et Gay-Lussac, Beccaria, Schubler, Arago, 1° que, quand le ciel est serein, l'électricité de l'air est toujours positive, dans les plaines comme sur les montagnes, par tous les vents et par toutes les saisons, même quand la terre est couverte de neige; 2° que l'électricité est plus grande dans les lieux élevés que dans les lieux bas, nulle dans les maisons, dans les rues ; mais qu'elle est sensible, dans les villes, sur les ponts et sur les places, et que dans un même lieu elle augmente à mesure qu'on s'élève au-dessus de la surface de la terre ; en rase campagne, elle ne commence à être sensible qu'à 3 ou 4 pieds au-dessus du sol ; 3° que l'électricité de l'air serein est plus forte en hiver qu'en été ; 4° que chaque jour, par un ciel serein, l'électricité de l'air a deux maxima et deux minima : le premier maximum a lieu de 7 à 9 heures du matin et le second de 7 à 9 heures du soir, le premier minimum vers 4 heures du matin et le second de 5 à 10 heures du soir ; enfin que la tension électrique aux deux maxima et aux deux minima va en croissant de juillet à janvier, et en décroissant de janvier à juillet. Ces variations périodiques proviennent probablement et de la production de l'électricité, et de la quantité de vapeur d'eau qui se trouve dans l'atmosphère, et enfin des décharges accidentelles de l'atmosphère par les pluies et les orages : dans les temps d'orage, l'électricité de l'air change à chaque instant de signe et d'intensité.

1004. *Causes de l'électricité atmosphérique.* Les circonstances dans lesquelles l'électricité se développe sont très-nombreuses ; jusqu'ici il n'a été question que du frottement : nous étudierons les autres causes quand nous aurons fait connaître les propriétés de l'électricité en mouvement ; mais nous devons indiquer ici les principales causes de la production de l'électricité atmosphérique. Ces causes sont l'évaporation et la végétation. Nous verrons bientôt que, quand on évapore une dissolution renfermant un sel, la vapeur d'eau s'électrise positivement, et la liqueur négativement ; on conçoit, d'après cela, que cette cause de développement d'électricité doit être très-puissante, la surface des eaux occupant une très-grande partie de la surface de la terre. Les plantes sous l'influence de la lumière décomposent l'acide carbonique de l'air, absorbent le carbone et émettent de l'oxygène qui se dégage toujours chargé d'électricité négative ; pendant la nuit, les phénomènes sont opposés. D'après M. Pouillet, une surface de 100 mètres carrés en pleine végétation produit dans un jour une quantité d'électricité suffisante pour charger la plus forte batterie ; mais dans ces expériences, M. Pouillet n'a point tenu compte de l'électricité produite par l'évaporation, et cette cause de développement d'électricité est plus grande que celle qui provient de la végétation : car l'électricité développée dans ces expériences avait le signe de celle qui résulte de l'évaporation.

Nous rapporterons quelques expériences de M. Mattenci qui viennent à l'appui des faits que nous venons de citer. Ce physicien, après avoir isolé une lame métallique de trois pieds carrés de surface, la mit en communication par un fil métallique avec un électroscope à feuilles d'or garni de son condensateur, puis il exposa cette lame au soleil à une température de 26° à 30° Réaumur, et la couvrit de terre ordinaire mouillée avec une forte dissolution de sel marin : l'évaporation avait à peine commencé que les lames d'or divergeaient sensiblement par l'électricité positive. Cette expérience, répétée plusieurs fois avec différentes espèces de terre et différentes dissolutions, a constamment donné les mêmes résultats ; mais la divergence des lames d'or était d'autant plus grande que l'air était plus agité,

Digitized by Google

parce qu'alors l'évaporation était plus rapide. Dans un bois, un électromètre surmonté d'une tige de bois terminée par une flamme ne donne point de signes électriques ; en sortant du bois, on obtient presque toujours une indication d'électricité positive. L'électricité manque souvent dans l'air pendant les nuits calmes et sereines ; mais, au point du jour, on trouve toujours dans les bois de l'électricité négative, qui bientôt disparaît. L'absence de l'électricité dans les bois pendant le jour peut s'expliquer par les électricités de signes contraires développées par l'évaporation et la végétation, et l'électricité négative pendant la nuit résulte probablement de l'électricité négative du sol que les plantes versent dans l'air.

1005. Il résulte nécessairement de ce qui précède que les mers, les lacs et les rivières, et, en général, toutes les eaux qui recouvrent la surface du sol et toutes les terres arides, doivent constamment se charger d'électricité négative, et que les terrains converts de plantes doivent se charger d'électricité positive, mais seulement pendant la saison de la végétation et pendant le jour; mais, comme les terres végétales donnent toujours naissance à de la vapeur d'eau, et qu'il en est de même des plantes, l'effet de la végétation doit être en grande partie dissimulé par celui de l'évaporation : alors la surface de la terre devra principalement se charger d'électricité négative, et cette électricité développée à la surface du sol devra ensuite se disséminer suivant la conductibilité des terrains qui le composent. Volta a d'ailleurs démontré d'une manière directe le fait de l'état électrique négatif de la terre : les pluies artificielles des cascades, telles que celles de Reichenbach et de Stendbach, possèdent l'électricité négative, ce qui ne peut s'expliquer qu'en admettant que l'eau, jaillissant contre les rochers, en a partagé l'état électrique. L'électricité de l'air devrait être toujours plus grande vers le milieu de la journée qu'au lever et au coucher du soleil, en été qu'en hiver, et dans les pays chauds que dans les pays froids; mais les variations de l'état hygrométrique de l'air, produisant des variations correspondantes dans sa conductibilité, doivent occasionner de grandes anomalies; elles expliquent très-bien les observations de Saussure, qui ne s'accordent pas avec les lois que suivrait l'électricité de l'air sec. L'électricité de l'air devra être positive; elle pourra être nulle à une petite hauteur, surtout dans les lieux bien boisés, et même négative par la communication directe de l'électricité du sol; l'électricité de l'air devra nécessairement s'accumuler dans les nuages, qui conduisent l'électricité beaucoup mieux que l'air; la pluie, les brouillards, devront servir souvent de conducteurs pour décharger l'électricité de l'air, et quand ces conducteurs seront insuffisants, l'électricité des nuages se déchargera brusquement sur la terre, dont la tension électrique aura été augmentée par influence.

L'électricité positive des nuages et négative de la terre explique très-bien pourquoi les nuages se rassemblent autour du sommet des hautes montagnes, et semblent y adhérer avec une force suffisante pour résister souvent à des vents assez forts.

1006. Ce qui précède explique l'état électrique de l'air dans les temps sereins; mais il reste à expliquer la formation des nuages orageux, et les variations de nature de l'électricité de ces nuages. La vapeur d'eau conduisant l'électricité beaucoup mieux que l'air sec, on conçoit que les vapeurs, en se réunissant pour former les nuages, doivent entraîner avec elles une grande partie de l'électricité qui se trouvait dans l'espace où elles étaient disséminées; il est aussi assez probable que les nuages ne deviennent orageux que quand ils sont devenus assez denses pour que l'électricité, qui jusqu'alors était restée répartie autour de chaque globule, se réunisse en totalité à la surface du nuage. Il est probable aussi que les nuages électrisés négativement proviennent de ce qu'ils ont été électrisés par l'influence d'autres nuages positifs, lorsqu'ils communiquaient avec la terre par des rochers, des arbres ou des vapeurs, et que la

Digitized by Google

communication a cessé par une cause quelconque. Des nuages peuvent aussi être négatifs seulement dans certaines parties. Il serait possible aussi que les vents de différentes directions qui existent toujours pendant les orages donnassent aux masses d'air, qui se trouvent à des températures différentes, des électricités de signes contraires.

1007. *Paratonnerres.* Les paratonnerres sont de grandes verges métalliques placées au sommet des édifices, et qui communiquent avec la terre humide ou avec l'eau par des conducteurs de même nature, et sans solution de continuité. Lorsqu'un nuage chargé d'électricité passe dans le voisinage, le paratonnerre est électrisé par influence; l'électricité de nature contraire à celle du nuage s'accumule vers la pointe, tandis que l'autre est refoulée dans le sol; la première s'écoule continuellement par la pointe, et neutralise souvent sans explosion l'électricité libre du nuage orageux. On peut facilement vérifier le fait que nous venons d'énoncer, en plaçant au-dessous ou à côté d'un conducteur isolé et électrisé une pointe communiquant avec le sol.

L'invention des paratonnerres est due au célèbre Franklin; leur utilité a été constatée par une expérience de plus de soixante-dix ans.

1008. Aux États-Unis d'Amérique, où les orages sont plus fréquents et plus redoutables qu'en Europe, l'usage des paratonnerres est devenu populaire. Un grand nombre de bâtiments ont été foudroyés, et on en compte à peine deux qui n'aient pas été mis entièrement à l'abri de la foudre par leurs paratonnerres. Il n'y a pas à craindre non plus que les édifices armés de ces appareils soient, par cela même, plus exposés à être foudroyés : car l'influence des paratonnerres ne s'exerce qu'à une petite distance; d'ailleurs, la propriété qu'auraient les paratonnerres d'attirer les nuages orageux supposerait aussi celle de transmettre librement l'électricité au sol, et, par conséquent, il n'en pourrait résulter aucun inconvénient.

1009. Nous avons dit que les paratonnerres devaient être terminés par des pointes aiguës : cette condition est importante pour que l'influence s'étende à la plus grande distance possible, et que le nuage soit neutralisé avant de se trouver à la distance explosive; si la tige était arrondie, elle n'en préserverait pas moins l'édifice; seulement il pourrait y avoir explosion sur le sommet de la tige, mais le fluide n'en suivrait pas moins le conducteur de préférence aux substances beaucoup moins conductrices qui constituent l'édifice. D'après le docteur Rittenhousse, les pointes d'un grand nombre de paratonnerres de Philadelphie ont été émoussées par la fusion, et on n'a point observé que les bâtiments auxquels ils appartiennent aient été frappés de la foudre depuis la destruction de ces pointes.

1010. Il nous reste maintenant à examiner les détails de construction nécessaire pour que les paratonnerres remplissent exactement l'objet auquel ils sont destinés.

1° La pointe qui termine la tige doit être très-aiguë, afin qu'elle agisse sous la plus petite influence possible, et par conséquent à la plus grande distance possible du nuage; et de plus, il est indispensable qu'elle ne puisse s'oxyder par le contact de l'air, ni se fondre facilement par des décharges électriques : car, si la pointe s'arrondissait ou par l'oxydation ou par la fusion, elle attirerait le nuage, et provoquerait les explosions que l'on veut éviter, mais qui cependant seraient sans danger (1009); la pointe doit donc être formée d'un métal difficile à fondre et non oxydable à l'air. On emploie ordinairement le platine; on termine la tige de fer par une tige de cuivre d'environ $0^m,50$, à l'extrémité de laquelle on soude à l'argent une aiguille de platine de $0^m,05$ de longueur.

2° La tige doit être assez élevée pour protéger tout l'édifice; d'après les observations de Charles, qui s'était beaucoup occupé de cet objet, il paraît qu'une tige aiguë protège contre la foudre un espace circulaire dont le rayon est double de sa hauteur :

Digitized by Google

il faudra donc donner à la tige une hauteur égale au quart du diamètre de l'édifice qu'elle doit protéger. Si l'édifice avait de trop grandes dimensions, on y placerait plusieurs paratonnerres; leur distance devrait être quatre fois plus grande que leur hauteur; les longueurs des tiges de paratonnerres le plus souvent employées sont de 7 à 9 mètres.

3° La partie inférieure de la tige devrait être isolée de l'édifice, et n'être en communication qu'avec le conducteur; mais cet isolement serait très-difficile à exécuter et à maintenir. Heureusement il n'est point indispensable, car l'électricité suit toujours de préférence les bons conducteurs : ainsi on pourra fixer la partie inférieure de la tige à une des pièces de charpente de la toiture.

4° Le conducteur qui fait communiquer la tige avec le sol doit y arriver par le plus court chemin, n'avoir aucune solution de continuité, et se prolonger jusque dans un puits ou dans un lieu humide, afin que la communication soit plus immédiate; si le terrain était sec, il faudrait faire descendre le conducteur de 4 ou 5 mètres dans la terre, et l'environner de charbon calciné, de braise (1); le coke est encore préférable, étant meilleur conducteur. Du fer ainsi enveloppé n'avait éprouvé aucune altération après trente ans. Il faudrait diriger de ce côté les eaux pluviales. Dans tous les cas, il faut que l'extrémité qui plonge dans la terre ou dans l'eau se divise en plusieurs branches, afin que la communication avec le sol soit la plus étendue possible, car c'est là que réside la principale cause de l'efficacité de l'appareil (2).

5° Le conducteur n'a pas besoin d'être isolé, par la raison que nous avons donnée plus haut; on lui fait suivre les murs de l'édifice en le soutenant par des tringles scellées dans les murailles et sur les toits.

6° La tige et les conducteurs doivent avoir des dimensions suffisantes pour que de fortes décharges ne puissent pas les fondre; on a reconnu par expérience qu'il suffisait de donner à la partie inférieure de la tige un diamètre de $0^m,05$, et aux conducteurs $0^m,025$.

7° La difficulté de former le conducteur avec des barres de fer a fait imaginer de les remplacer par des cordes en fil de fer; celles de 15 à 16 millimètres de diamètre paraissent suffisantes dans tous les cas. Pour éviter l'oxydation du métal, on couvre ordinairement les conducteurs d'une couche de goudron.

8° Lorsque l'édifice renferme des pièces métalliques un peu considérables, telles que des gouttières ou des lames de plomb, il faut les faire communiquer avec le conducteur.

9° Lorsqu'on place plusieurs paratonnerres sur un édifice, on établit un conducteur pour chaque paire de tiges.

10° Quelquefois on place sur les bâtiments isolés des tiges horizontales ou plus ou moins inclinées, communiquant avec le conducteur; elles servent à préserver l'édifice des lambeaux de nuages orageux que les vents pourraient jeter sur ses faces.

La figure 567 représente la tige d'un paratonnerre, et la figure 568 la disposition de la tige et des conducteurs sur un édifice. Une grande partie de ce qui précède a été extrait du rapport fait à l'Académie par M. Gay-Lussac, au nom d'une commission chargée de rédiger une instruction sur les paratonnerres. (Voyez, pour plus de détails, les *Annales de physique et de chimie*, tome XXVI.)

(1) Le charbon non calciné ne conduit ni l'électricité ni la chaleur, il brûle facilement dans l'air; le charbon calciné conduit facilement l'électricité et la chaleur, mais il brûle difficilement et s'éteint dans l'air : ce dernier à une plus grande densité que le premier, et absorbe moins d'eau à l'état de vapeur ou par immersion que le premier.

(2) En 1753 le professeur Richmann, de Pétersbourg, fut foudroyé pour s'être approché de trop près d'une tige métallique isolée qu'il avait placée sur sa maison.

Digitized by Google

1011. On a prétendu que les paratonnerres pouvaient avoir de l'influence sur la chute de la grêle; mais il est évident que ces appareils n'auront quelque efficacité qu'autant que les pointes qui les terminent pourront agir sur les nuages orageux. Dans les vallées fermées par des montagnes élevées et voisines, et qui seraient hérissées de paratonnerres, il est très-probable que l'on parviendrait à empêcher la formation de la grêle, parce que ces instruments exerceraient leur influence à des hauteurs suffisantes; mais dans les grandes plaines il paraît difficile d'élever des paratonnerres de manière à pouvoir conjurer l'orage. Il y a entre la foudre et la grêle cette grande différence : la foudre n'éclate que lorsque l'objet sur lequel elle doit se porter est déterminé; la grêle, au contraire, se forme indépendamment des corps sur lesquels elle doit tomber. On conçoit d'après cela que les paratonnerres préservent constamment, et dans toutes les circonstances, des effets de la foudre, et qu'ils ne peuvent empêcher la formation de la grêle qu'autant que les nuages orageux sont dans leur sphère d'activité; ce qui ne peut avoir lieu que dans certaines circonstances.

CHAPITRE IV.

ÉLECTRICITÉ DÉVELOPPÉE PAR LA CHALEUR DANS LES CRISTAUX.

1012. La chaleur, comme nous l'avons vu, a une grande influence sur l'électricité développée par la pression et le frottement; mais elle agit sur certains corps cristallisés pour séparer les deux électricités; elles se réunissent principalement aux deux extrémités, qui acquièrent des tensions égales, mais de signes contraires.

1013. On peut facilement vérifier ce fait sur la tourmaline : en la chauffant et présentant successivement ses deux extrémités à un petit pendule, il est attiré par tous deux; mais si on communique de l'électricité au pendule, il est attiré par une des extrémités de la tourmaline, et repoussé par l'autre. On peut encore vérifier ce dernier fait au moyen de l'appareil *fig.* 569, qui est composé d'une plaque horizontale lestée par les boules *a* et *b*, et garnie à son centre d'une chappe qui repose sur une pointe aiguë. On place sur la plaque une tourmaline échauffée, et on présente successivement à ses deux extrémités une autre tourmaline également échauffée : un des pôles de la tourmaline est attiré, l'autre est repoussé; le sommet à trois faces possède l'électricité négative, et le sommet à six faces l'électricité positive.

1014. Mais pour découvrir les plus faibles traces de polarité dans les tourmalines, il vaut mieux employer la disposition représentée *fig.* 570; l'aiguille est suspendue dans une chappe de papier à l'aide d'un fil de soie sans torsion, elle est environnée d'un cylindre de verre, ouvert par les deux bouts, reposant sur une plaque métallique que l'on échauffe avec une lampe à esprit de vin; l'échauffement étant très-lent, la température de la tourmaline sera sensiblement représentée par celle d'un thermomètre qui serait placé dans le cylindre à la même hauteur que l'aiguille; pour reconnaître l'espèce d'électricité qui s'est développée dans le cristal, on introduit par la partie supérieure du cylindre un corps faiblement électrisé et soutenu à l'aide d'un manche isolant et que l'on présente aux deux extrémités de la tourmaline.

Digitized by Google

1015. Æpinus a imaginé une disposition très-simple pour manifester l'électricité polaire de la tourmaline. *AB* (*fig.* 371) est un segment de tourmaline perpendiculaire à l'axe du prisme, tel que sont ordinairement les tourmalines taillées pour être montées en bagues; *MN* et *PQ* sont deux petites capsules métalliques qui embrassent la lentille de tourmaline; elles communiquent avec deux petites tiges *ab* et *cd* entre lesquelles se trouve un petit pendule de moelle de sureau, suspendu à l'extrémité d'un fil de soie très-fin. Quand la tourmaline a été électrisée par immersion dans l'eau chaude, le pendule oscille pendant des heures entières entre les tiges *ab* et *cd*.

1016. Il résulte des nombreuses expériences qui ont été faites sur la tourmaline par Canton, Wilson, Priestley, Bergmann, Æpinus, Haüy, et récemment par M. Becquerel,

1° Que toutes les tourmalines, même celles qui proviennent du même gisement, ne sont pas également susceptibles de devenir électriques par la chaleur; qu'il en existe qui ne le deviennent point; il paraît que ce sont surtout les plus longues qui sont dans ce dernier cas; enfin qu'il existe des tourmalines qui ne deviennent électriques que par un échauffement rapide.

2° Que pour chaque tourmaline il y a deux limites de température au delà desquelles le développement des pôles ne se manifeste pas; ces limites sont ordinairement 10° et 150°, mais elles varient avec les dimensions des tourmalines.

3° Que l'électricité polaire ne se manifeste que quand la tourmaline s'échauffe ou se refroidit dans toute son étendue. Quand sa température reste stationnaire, toute polarité disparaît; quand on échauffe ou qu'on refroidit une des extrémités seulement, la tourmaline ne possède qu'une seule espèce d'électricité.

4° Que les pôles électriques, qui se manifestent par l'échauffement, changent de nature quand le corps se refroidit.

5° Que lorsqu'une tourmaline est électrique par la chaleur, et qu'on la brise en deux ou en un plus grand nombre de fragments, chacun d'eux possède la propriété d'acquérir deux pôles par la chaleur.

6° Que les tourmalines les plus électriques par la chaleur sont transparentes, et que le sommet qui renferme le plus de facettes est celui qui prend l'électricité positive par le refroidissement.

1017. Le développement de l'électricité par la chaleur a d'abord été reconnu dans la tourmaline; il paraît que depuis un temps immémorial on avait remarqué dans l'Inde et dans l'île de Ceylan que cette pierre jetée dans le feu avait la propriété d'attirer les cendres. Les Hollandais, auxquels les naturels du pays montrèrent ce phénomène, furent les premiers qui le firent connaître en Europe. Longtemps les tourmalines ont été très-rares en Europe; maintenant elles y sont très-communes depuis la découverte en Espagne d'un gisement qui en renferme une grande quantité.

1018. Les cristaux électriques par la chaleur sont très-nombreux : le tableau suivant en renferme la liste d'après M. Brewster.

Diamant.	Chaux fluatée.
Soufre.	Sulfure d'arsenic.
Zinc oxydé.	Scolézite.
Quartz.	Émeraude.
Carbonate de chaux.	Topaze.
Carbonate de plomb.	Tourmaline.
Sulfate de baryte.	Titane silicéo-calcaire (sphène).
Sulfate de strontiane.	Acide tartrique.
Magnésie boratée.	Acide citrique.

Digitized by Google

Tartrate de soude et de potasse.	Axinite.
Oxalate d'ammoniaque.	Grenat.
Oxymuriate de potasse.	Diopside.
Sulfate de soude et de magnésie.	Sulfate de magnésie.
Sulfate d'ammoniaque.	Prussiate de potasse.
Sulfate de fer.	Acétate de plomb.
Mésotype.	Carbonate de potasse.
Mésolite.	Oxymuriate de mercure.
Analcime.	Sucre.
Prénite.	

La polarité électrique n'a été constatée que dans les cristaux qui dérogent à la loi de symétrie; dans les autres, le docteur Brewster a seulement reconnu une attraction sur les corps très-légers. Pour ces derniers, les faits observés par le docteur Brewster ne sont pas suffisants pour constater qu'ils étaient réellement électrisés (M. Becquerel).

Les phénomènes que présente la tourmaline, et qui seraient probablement offerts par toutes les autres substances électriques par la chaleur, ne peuvent point être expliqués dans l'état actuel de la science.

CHAPITRE V.

ÉLECTRICITÉ DYNAMIQUE.

§ Ier. *Phénomènes généraux.*

1019. En 1789, Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, en faisant des recherches sur l'irritabilité nerveuse des cadavres de grenouilles par l'électricité, reconnut que, quand on mettait les muscles et les nerfs en communication par un arc composé de deux métaux, ces organes éprouvaient de violentes convulsions. Galvani attribua cet effet à des électricités de nature contraire renfermées dans les muscles et les nerfs; cette opinion fut alors généralement admise. Mais bientôt Volta, à qui la physique devait déjà l'électrophore, le condensateur et l'eudiomètre, découvrit que les effets observés par Galvani étaient dûs au contact des métaux qui formaient l'arc de communication. Ce fait, que Volta démontra par des expériences multipliées, le conduisit bientôt à la découverte de la pile qui porte son nom. Cet appareil a amené dans la science une ère nouvelle par les nombreux phénomènes qu'elle a fait découvrir.

1020. Voici les expériences par lesquelles Volta parvint à constater le développement de l'électricité dans le contact des métaux. Si l'on prend deux disques métalliques *A* et *B* (*fig.* 572) de nature différente, bien polis, non vernis, et garnis de manches isolants, et qu'après les avoir appliqués l'un contre l'autre en les tenant par ces manches, on les sépare, ils se trouvent chargés d'électricités contraires; mais comme leur tension électrique est extrêmement faible, il faut accumuler les petites

Digitized by Google

quantités d'électricité développées par chaque contact dans l'électromètre condensateur (*fig.* 554).

On parvient alors, après un certain nombre de contacts, à charger l'instrument non-seulement de manière à reconnaître l'espèce d'électricité acquise par le disque, mais encore à produire des étincelles. Pour que cette expérience réussisse, il faut que le plateau collecteur soit formé avec le même métal que le disque avec lequel on le touche, et qu'il ne soit point verni aux points de contact. Lorsque le plateau collecteur et le disque sont de nature différente, il faut placer sur le plateau collecteur un morceau de papier humide : en le touchant dans cet endroit avec le disque, l'électricité passe de l'un à l'autre, et il n'y a point d'effet dû au contact du disque et du plateau. On pourrait aussi faire cette expérience en laissant le condensateur isolé, et touchant en même temps les deux plateaux avec les deux disques.

On pourrait supposer que dans ces expériences l'électricité est développée par la pression; mais en soudant bout à bout deux lames métalliques (*fig.* 573), on les trouve encore dans deux états électriques opposés. En opérant avec une lame de cuivre et une lame de zinc soudées bout à bout, tenant la lame de zinc et touchant avec la lame de cuivre le plateau collecteur de l'électromètre, que nous supposons être également en cuivre, on trouve que le condensateur acquiert son maximum de charge par un seul contact, et par conséquent qu'il passe plus d'électricité dans le condensateur qui si la lame de zinc était isolée. On en concevra facilement la raison en observant 1° que, le zinc communiquant avec le sol, il se développe instantanément plus d'électricité dans le cuivre, par la même raison que le plateau d'une machine électrique donne plus d'électricité quand les coussins communiquent avec le sol que quand ils sont isolés; 2° que, le développement de l'électricité étant instantané, à mesure que le cuivre abandonne au plateau collecteur celle qu'il a reçue, il se recharge aux dépens du zinc, et ce dernier aux dépens du sol, et par conséquent que l'électromètre doit prendre par un seul contact une tension égale à celle de la lame de cuivre, et, par suite, que dans un seul contact il acquiert toute la charge qu'il peut recevoir. Si on tenait la lame par l'extrémité cuivre, en touchant le plateau collecteur de cuivre par l'extrémité zinc on ne pourrait jamais parvenir à charger le condensateur, parce que le zinc ayant déjà le maximum de tension qu'il peut acquérir par le contact du cuivre, celui-ci étant à l'état naturel, le zinc en touchant de nouveau du cuivre isolé ou en communication avec le sol, ne lui cédera point l'électricité qu'il possède et ne pourra point non plus y développer une électricité contraire. Si on plaçait sur le plateau collecteur un morceau de papier humide, que l'on toucherait avec la lame de zinc, les deux métaux ne seraient plus en contact immédiat, et comme ils communiqueraient par un corps bon conducteur, l'instrument se chargerait.

Il est évident, d'après ce qui précède, que, si on touchait le plateau collecteur directement avec une lame de zinc que l'on tiendrait à la main, on chargerait le condensateur de la même manière. En opérant ainsi avec différents métaux, on trouve que le plomb, l'étain, de fer, le bismuth et l'antimoine donnent comme le zinc de l'électricité négative au condensateur, tandis que l'or, l'argent, le platine et le palladium lui donnent de l'électricité positive.

1021. D'après les expériences de Volta, la plus petite différence entre les métaux suffit, lorsqu'ils sont en contact, pour les faire passer dans deux états électriques opposés : deux plaques de même métal, dont une a été frottée avec une troisième, diffèrent assez pour devenir électriques lorsqu'elles se touchent. On a fait beaucoup d'expériences pour déterminer l'état électrique qu'acquièrent les métaux par leur contact, mais elles n'ont pas été encore assez multipliées pour permettre d'en former

Digitized by Google

un tableau complet. Nous donnons, d'après M. Berzélius, le tableau ci-après, dans lequel chaque métal devient positif lorsqu'on le met en contact avec ceux qui précèdent, et négatif avec ceux qui suivent :

Or.	Argent.	Plomb.
Iridium.	Cuivre.	Fer.
Rhodium.	Nickel.	Cadmium.
Platine.	Cobalt.	Zinc.
Palladium.	Bismuth.	Manganèse.
Mercure.	Étain.	

1022. Les métaux ne sont pas les seuls corps qui deviennent électriques par leur contact. M. Becquerel a reconnu 1° que les métaux prennent avec les acides l'électricité positive, et l'électricité négative lorsqu'ils sont en contact avec les alcalis; 2° que l'eau se comporte avec les métaux facilement oxydables comme les acides; 3° que les métaux deviennent aussi électriques par le contact avec la flamme du papier et de l'alcool. La propriété de développer de l'électricité par le contact paraît appartenir à tous les corps; mais pour la plupart les tensions sont si faibles qu'il faut des instruments d'une sensibilité extrême pour les reconnaître.

1023. Les physiciens ne sont cependant point d'accord sur les expériences par lesquelles Volta a démontré le développement de l'électricité par le contact. M. Delarive pense que le développement de l'électricité provient d'une action chimique produite par l'air humide ou la main sur le métal le plus oxydable, et que, quand on se met à l'abri de toute action chimique, il n'y a point de dégagement d'électricité; mais M. Pfaff et M. Peltier ont reproduit les expériences de Volta dans des circonstances qui ne permettent pas le moindre doute sur le fait avancé par Volta. Nous reviendrons plus tard sur cette question, et provisoirement nous exposerons la théorie de Volta telle qu'il l'a donnée.

1024. Volta désigne sous le nom de *force électro-motrice* une force qui se développe dans le contact de deux corps et par le contact même. Cette force produit un développement instantané d'électricité, à la suite duquel un des corps prend l'électricité positive, l'autre l'électricité négative, si tous deux sont isolés. La tension acquise par les deux corps a pour limite la puissance électro-motrice elle-même, qui s'oppose à la combinaison des deux électricités et suspend la conductibilité; mais si les deux corps recevaient chacun une addition égale d'électricités contraires, les deux charges additionnelles se combineraient. Si un des corps était mis en contact avec le sol, sa tension deviendrait nulle. Volta admet que celle de l'autre serait doublée, de sorte que la différence algébrique des deux tensions est constante. Volta admet encore que si les deux plaques en contact étaient mises en communication avec un même corps conducteur, ayant une force électro-motrice nulle ou insensible, les deux électricités se recomposeraient continuellement à travers le troisième corps, tandis que la force électro-motrice développerait constamment de nouvelle électricité entre les deux premiers.

1025. *Pile de Volta.* La pile de Volta se compose toujours de trois corps, dont deux sont métalliques, ou du moins, bons conducteurs, et un liquide. Ces corps sont ordinairement du cuivre rouge, du zinc et de l'eau acidulée. Ces trois corps sont disposés les uns à la suite des autres successivement dans le même ordre : chaque période porte le nom d'*élément*.

La disposition la plus simple consiste à donner aux plaques métalliques la forme de disques, et à les superposer dans le même ordre, en interposant entre chaque

Digitized by Google

couple une rondelle de papier ou de drap, mouillée avec de l'eau acidulée. La pile peut être montée sur un corps isolant ou conducteur. Les effets que nous allons décrire sont les mêmes.

Lorsqu'on touche les deux extrémités de la pile avec les deux mains préalablement mouillées, on éprouve des commotions analogues à celles qui résultent de la décharge d'une bouteille de Leyde, mais qui sont continues. Quand on met les extrémités de la pile en contact avec les muscles et les nerfs d'un cadavre récent, les muscles éprouvent de violentes contractions; et quand la communication est établie par un fil métallique ou un liquide, il se produit de la chaleur, des effets magnétiques et chimiques que nous exposerons plus loin avec tous détails nécessaires. Voici l'explication que Volta a donnée de cette puissante machine électrique.

Mettons en contact avec le sol un disque de cuivre (*fig.* 574), et plaçons au-dessus un disque de zinc : d'après la théorie de Volta, le zinc acquerra une certaine quantité d'électricité que nous représenterons par a, et le cuivre sera à l'état naturel. Au-dessus du disque de zinc plaçons un drap humide h; ce corps étant bon conducteur partagera l'électricité de z, et celui-ci reprendra au cuivre et ce dernier au sol une quantité d'électricité nécessaire pour rétablir dans h et z la tension primitive de z; sur le drap h mettons une seconde couple $z'c'$ de zinc et de cuivre disposé comme le premier; c' prendra de l'électricité à h comme corps conducteur, et la tension primitive de z s'établira sur h, c' et z' aux dépens du sol; mais en admettant que dans la couple $z'c'$, z' doit avoir sur c' la même différence de tension que z sur c, z' prendra la tension $2a$; en continuant ainsi on voit que h' et c'' prendront la tension $2a$, z'' la tension $3a$, et ainsi de suite, de sorte que

$$\begin{array}{ll} z,\ z',\ z'',\ z'''\ldots\ z^{(n)}, & \text{auront les tensions } a,\ 2a,\ 3a\ldots\ (n+1)\ a, \\ c,\ c',\ c'',\ c'''\ldots\ c^{(n)}, & \text{auront les tensions } o,\ a,\ 2a\ldots\ na, \\ h,\ h',\ h'',\ h'''\ldots\ h^{(n-1)}, & \text{auront les tensions } a,\ 2a,\ 3a\ldots\ na. \end{array}$$

1026. Si la pile était montée en sens contraire, c'est-à-dire si le zinc communiquait avec le sol, la distribution de l'électricité serait la même, seulement l'électricité serait négative.

1027. Si la pile, au lieu de communiquer avec le sol, était isolée, elle se chargerait aux dépens d'elle-même des deux électricités; une moitié renfermerait l'électricité positive et l'autre l'électricité négative; les tensions des disques, également éloignés du milieu, seraient égales, et elles iraient en croissant du milieu, où elles seraient nulles, jusqu'aux extrémités, où elles seraient à leur maximum : car, si on monte deux piles égales en sens contraire, communiquant par leurs bases inférieures avec le sol, les disques inférieurs de nature différente étant à l'état naturel, rien ne sera changé si on suppose les piles réunies par leurs parties inférieures, par un corps bon conducteur, non électro-moteur, par exemple par une rondelle de drap mouillée. Alors on aura une pile isolée, dans chaque moitié de laquelle l'électricité sera répartie comme dans une pile en contact avec le sol. Mais la tension des pôles sera évidemment deux fois plus petite que dans une pile d'un même nombre d'éléments communiquant par une extrémité avec le sol.

1028. Cette explication repose sur deux hypothèses : la première, que la différence de tension dans les éléments est une quantité constante, ce qui n'est point démontré; la seconde, que le liquide n'agit que comme conducteur, ce qui n'est point exact, car en employant une pile de fer et de cuivre, et remplaçant l'eau acidulée par une dissolution alcaline les pôles de la pile sont intervertis. D'ailleurs on a bien reconnu par expérience que la tension d'une même pile augmente avec le nombre

Digitized by Google

des éléments; mais dans les piles isolées les tensions sont inappréciables, et cependant, d'après la théorie de Volta, elles seraient seulement la moitié de celle qu'on obtiendrait en mettant une des extrémités en contact avec le sol. Ainsi la théorie de Volta ne peut être admise, du moins telle qu'il l'a donnée.

1029. *Différentes formes de piles.* La pile voltaïque telle que nous venons de la décrire présente plusieurs inconvénients que l'on a cherché à faire disparaître par une autre disposition. Le premier consiste en ce que, les disques s'oxydant facilement, toutes les fois qu'on remontait la pile il fallait nettoyer les faces des disques qui devaient être en contact, sans quoi on n'obtenait qu'une très-petite partie de l'électricité qu'elle pouvait développer. Le second consiste en ce que, chaque rondelle de carton supportant le poids des disques supérieurs, le liquide s'en écoulait, ils devenaient alors moins bons conducteurs, et le liquide, en ruisselant le long de la pile, la déchargeait en partie. On a fait disparaître ces deux inconvénients en soudant les disques et en plaçant la pile dans une position horizontale.

1030. La figure 574 *A* représente une pile composée d'une série de plaques de cuivre et de zinc soudées bout à bout et plongeant par leurs extrémités dans des verres remplis de liquides conducteurs. Il est évident que cet appareil satisfait à toutes les conditions nécessaires au développement de l'électricité : Volta le désigne sous le nom d'*appareil de tasses à couronne.*

1031. L'appareil *fig.* 575 désigné sous le nom de *pile à auges* est formé de couples rectangulaires soudées et mastiquées avec une matière isolante dans une caisse horizontale; on remplit les intervalles des plaques avec un liquide conducteur : il est évident que l'effet produit doit être le même que dans la pile verticale.

1032. L'appareil *fig.* 576 est une nouvelle forme de pile, due à Wollaston. Les plaques de cuivre et de zinc sont soudées par un prolongement étroit et disposées comme l'indiquent les figures 577, 578; la lettre *c* indique le cuivre, et la lettre *z* le zinc. Lorsqu'on veut mettre la pile en activité, on descend la barre horizontale *AB* de manière à faire plonger les plaques dans les vases *M*, *M'*... remplis de liquide conducteur. Nobili a proposé de percer les éléments de Wollaston de manière que les éléments zinc et cuivre soient comme des peignes et que les parties pleines soient en regard. On obtient le même effet avec beaucoup moins de dépense en zinc et en acide ; il donne 1 pouce de jour et 1/2 pouce de plein. Dans ces sortes de piles le pôle positif se trouve du côté du dernier élément cuivre, car, ne communiquant pas avec le zinc, il ne sert que de conducteur.

Cette disposition est surtout avantageuse pour une circulation rapide de l'électricité; on en concevra facilement la raison, en observant que l'électricité qui s'accumule dans chaque plaque de zinc peut sortir par tous les points de sa surface, qu'elle n'a qu'une faible couche de liquide à traverser pour se porter sur le cuivre qui l'environne, et que cette couche de liquide, qui s'altère promptement se renouvelle en se mêlant au liquide du vase. La différence de l'effet de cette pile et de celui des piles à auges ne provient pas seulement des surfaces de cuivre en regard du zinc; la surface extérieure du cuivre a aussi une influence, mais elle est plus petite que celle des surfaces intérieures et d'autant plus que les lames sont plus rapprochées.

1033. Lorsque l'étendue de la surface d'une des lames d'un élément reste constante et qu'on augmente progressivement celle de l'autre, l'intensité du courant croît beaucoup plus rapidement quand on augmente l'étendue de la surface du cuivre que celle du zinc. Toutes les couples que l'on forme en combinant entre eux le zinc, le fer, le plomb, l'étain, le cuivre, le laiton, l'argent, l'or, le platine, donnent ce résultat général, qu'en augmentant la surface baignée du métal négatif on augmente beaucoup plus les effets de l'appareil que par le changement contraire. L'effet d'une

Digitized by Google

couple de cuivre et zinc à plaques égales ne change pas lorsqu'on réduit la surface de zinc à 1/7 de son étendue, si l'on augmente celle du cuivre de 1/8 ou de 1/7 au plus. On peut ainsi épargner beaucoup de zinc dans la construction des piles (Marianini). Mais quand les lames sont placées à une petite distance et qu'on fait varier les grandeurs relatives des plaques de manière que leur somme reste constante, le maximum d'effet a lieu quand les surfaces des plaques sont égales (Bigeon). L'effet produit par les mêmes éléments et le même liquide augmente à mesure que les plaques sont plus rapprochées, mais suivant une loi incomparablement moins rapide que la raison inverse de la distance.

1034. On emploie quelquefois la réunion de plusieurs piles. On peut réunir les piles de deux manières, 1° en mettant en contact les pôles négatifs entre eux, et les pôles positifs entre eux; 2° en réunissant le pôle négatif de la première avec le pôle positif de la seconde. Dans le dernier cas, on produit le même effet qu'avec une pile dont le nombre des couples serait égal à la somme des couples des deux piles. Dans le premier on augmente l'étendue des éléments. On emploie la première disposition pour produire des effets qui dépendent de l'étendue des couples; la seconde pour produire ceux qui dépendent de la tension.

1035. On fait souvent usage d'appareils voltaïques formés d'une seule couple de grandes dimensions : la disposition la plus commode à donner à cet appareil est représentée *fig.* 379; la couple est formée de deux plaques de cuivre et de zinc, séparées par des bandes de carton ou de drap, et roulées en spirale sans se toucher; on introduit cet appareil dans un vase plein de liqueur conductrice, et on fait communiquer les deux plaques par le corps à travers lequel on veut faire passer le courant. On emploie aussi quelquefois des vases de cuivre remplis d'eau acidulée, dans lesquels on suspend des plaques de zinc, et on établit la communication entre le cuivre et le zinc par le corps que le courant doit traverser.

Comme le développement de l'électricité dans la pile est très-rapide, elle peut être isolée par tous les corps qui ne sont pas de très-bons conducteurs; il n'est point alors nécessaire d'employer toutes les précautions qui sont indispensables pour isoler les corps chargés d'électricité développée par le frottement.

1036. *Piles secondaires de Ritter.* Les piles de Ritter sont formées de disques de cuivre et de carton humide entremêlés; elles ne développent point d'électricité par elles-mêmes, mais quand elles ont été mises en communication avec une pile ordinaire; elles produisent, lorsqu'on touche leurs pôles, des décharges et des décompositions chimiques comme la pile ordinaire, mais qui vont en s'affaiblissant. Les pôles des piles de Ritter sont contraires à ceux de la pile avec lesquels le contact a eu lieu. Ritter a observé que plus il y avait d'intermittences dans les disques, leur nombre restant le même, plus la conductibilité était petite, et plus la charge que la pile pouvait recevoir était grande. Nous verrons plus tard que l'effet des piles de Ritter dépend des substances acides et alcalines que le courant de la pile voltaïque a déposées sur les faces des disques métalliques, pendant que la circulation était établie.

1037. *Piles sèches.* On a fait beaucoup d'essais pour construire des piles sans l'intervention des conducteurs liquides; on a obtenu des appareils qui ont une tension sinon permanente, du moins de longue durée, mais dont la faculté conductrice est si faible, et par conséquent la charge si lente, qu'ils ne produisent ni commotion ni aucun des autres effets des piles ordinaires.

Les premiers essais sur les piles sèches ont été faits en 1803 par MM. Hachette et Désormes. Ils employaient des lames de cuivre et de zinc séparées par de la colle d'amidon; ensuite M. Biot imagina d'employer pour corps conducteur du nitrate de potasse fondu. En 1809, Deluc présenta à la société royale de Londres un appareil de

Digitized by Google

six cents paires, formées avec du zinc laminé et du papier cuivré; et, en 1812, Zamboni fit connaître la pile dont nous allons parler.

On prend une feuille de papier ordinaire un peu fort; sur une des faces on colle une lame de zinc ou d'étain, et sur l'autre du peroxyde de manganèse; on superpose plusieurs feuilles ainsi préparées, et, à l'aide d'un emporte-pièce, on enlève des disques circulaires que l'on superpose ensuite dans le même ordre. On en réunit ainsi de 500 à 2000 : alors on les maintient serrés sous une presse, et on les environne d'une couche épaisse de gomme laque; à l'extrémité zinc de la pile, on place un disque de zinc épais sur lequel on peut visser un bouton, et à l'autre une plaque épaisse de cuivre. Cette méthode est la meilleure que l'on connaisse.

On emploie quelquefois du papier imbibé d'une substance conductrice, telle qu'une dissolution d'un sel déliquescent, du miel, de la mélasse : ces piles sont plus fortes dans le commencement; mais elles s'affaiblissent plus rapidement que les autres.

Au lieu de zinc ou d'étain et de peroxyde de manganèse, on pourrait employer deux autres métaux quelconques qui n'auraient pas la même faculté électromotrice : le platine, l'or et l'argent ne pourraient pas être employés avec succès, parce qu'ils tendent par le contact à s'emparer avec la même énergie de l'électricité négative.

1038. *Considérations générales sur les effets des piles.* Les effets des piles sont produits ou par la tension qui se développe dans les pôles, ou par le mouvement de l'électricité dans le corps qui établit la communication entre les deux pôles : les premiers augmentent avec le nombre des éléments, et sont indépendants de leur étendue et de la nature du liquide conducteur. Les effets produits par les courants sont ou magnétiques, ou calorifiques, ou chimiques : dans tous les cas, ces effets augmentent avec la faculté conductrice du liquide de la pile; mais l'influence de la grandeur des éléments et de leur nombre est très-variable. Cependant on peut poser en principe 1° que, si le circuit est court et formé d'un métal, le nombre des éléments est sensiblement sans influence : il faut alors employer des piles à un seul élément et à grande surface; 2° que, si le circuit, toujours métallique, est formé d'un fil long et d'un petit diamètre, l'effet augmente avec le nombre des éléments de la pile; 3° que, si le circuit est formé d'un liquide, il faut nécessairement employer des piles ayant un grand nombre d'éléments.

Nous allons maintenant étudier avec détails les différentes classes de phénomènes produits par la pile.

§ II. *Effets produits par la tension des pôles.*

1039. Nous avons déjà dit que la tension des pôles d'une pile peut souvent se reconnaître directement, ou en approchant l'un de l'autre deux fils métalliques très-fins, communiquant avec eux : quand ils sont assez voisins, il se dégage une petite étincelle. Dans tous les cas, on peut charger un condensateur, une bouteille de Leyde, etc. : on obtient alors des phénomènes absolument semblables à ceux qui résultent de l'accumulation de l'électricité produite par le frottement. La charge que peut acquérir le condensateur a lieu par un seul contact instantané pour les piles ordinaires et même pour les piles sèches, à moins que le corps solide interposé entre les plaques ne soit très-mauvais conducteur : alors la charge exigerait un temps appréciable; c'est ce que M. Biot a reconnu en employant des plaques de nitre fondu. Il faut observer que, pour charger le condensateur, la communication doit être établie de la manière la plus intime entre la pile et le plateau collecteur. La disposition la plus avantageuse, d'après M. Biot, est celle de la figure 580 : au-dessus de

Digitized by Google

la pile on met un petit godet en fer plein de mercure, dans lequel plonge un fil qui communique avec le condensateur.

1040. La tension d'une pile dépend de la nature des métaux qui la composent, du nombre des éléments, et nullement de leur étendue et de la faculté conductrice du liquide interposé : aussi une pile à auge montée avec de l'eau pure charge le condensateur de la même manière que quand elle est montée avec une dissolution acide ou salée; mais elle ne donne aucune commotion, et ne produit aucune action chimique.

D'après M. Biot, la tension augmente proportionnellement au nombre des éléments; mais, d'après des expériences plus récentes de M. Peltier, la tension croîtrait suivant une loi beaucoup plus rapide.

1041. Lorsqu'on fait communiquer les deux pôles d'une pile par un fil métallique, les tensions des pôles disparaissent. Lorsqu'après avoir établi la communication entre les deux pôles d'une pile on interrompt le circuit, la tension au premier instant est d'autant plus petite que le circuit est resté fermé plus longtemps, du moins jusqu'à une certaine limite de temps, 15 à 20 minutes. La diminution de tension due à l'établissement du circuit dans un temps donné est d'autant plus considérable que le nombre des éléments est plus grand, et que le liquide est moins conducteur : le plus ou moins de conductibilité de l'arc qui établit la communication est sans influence. Le temps que les piles emploient à recouvrer leur tension primitive est d'autant plus grand que le circuit est resté fermé plus longtemps; quand on ne ferme pas le circuit, la tension paraît rester constante.

1042. Au moyen de la pile, M. Ermann a fait des observations très-curieuses sur la faculté conductrice des corps pour l'électricité sous une faible tension. Si l'on fait communiquer les pôles d'une pile isolée avec deux électroscopes à feuille d'or, tous deux sont électrisés; si alors on prend un cylindre de savon sec, à l'une des extrémités duquel on insère un fil métallique, en mettant ce dernier en communication avec le sol et le savon en contact avec une des extrémités de la pile, l'électroscope correspondant revient à l'état naturel, et l'autre indique une plus forte tension: le savon remplit donc alors l'office de bon conducteur pour l'une et l'autre électricité. Mais si on fait communiquer les deux pôles de la pile par un fil métallique isolé, interrompu par le savon, les électroscopes continuent à indiquer la même tension, et par conséquent le savon agit comme mauvais conducteur; enfin si on touche le savon avec un corps bon conducteur, le pôle négatif seul est neutralisé: le savon ne conduit donc alors que le fluide négatif. La flamme d'alcool a présenté les mêmes phénomènes; mais sa faculté conductrice est en faveur du fluide positif: la flamme du phosphore, la gélatine, l'ivoire, ont donné les mêmes résultats. On explique, mais incomplétement, ces phénomènes, en admettant dans chacun de ces corps une différence de conductibilité pour les deux fluides, qui ne devient sensible que pour les petites tensions.

1043. On a employé les piles sèches pour produire une espèce de mouvement perpétuel. Si on place deux piles sèches parallèlement sur un support conducteur, les pôles contraires en regard (*fig.* 581), entre les piles un support portant une aiguille de verre terminée par des balles de sureau *m* et *n*, l'aiguille sera successivement attirée et repoussée par les deux pôles, et prendra un mouvement oscillatoire qui durera tant que la pile conservera une tension sensible; on pourrait aussi donner à l'aiguille mobile un mouvement de rotation horizontale continu. On a construit de ces appareils qui ont marché pendant plusieurs années. Ces mouvements sont cependant très-irréguliers. On en concevra facilement la raison en observant que, les piles sèches ayant une conductibilité très-faible, elles exigent un temps plus ou moins long pour

Digitized by Google

acquérir le maximum de tension, et que cette tension doit nécessairement dépendre de l'état hygrométrique de l'air; aussi les piles sèches ont moins d'action en été qu'en hiver. Ces appareils finissent d'ailleurs toujours par s'arrêter après un certain temps.

1044. M. Bohnenberger a fait une heureuse application de la tension des piles sèches à la construction d'un électroscope condensateur, d'une sensibilité extrême. Cet appareil, perfectionné par M. Becquerel, est formé d'une pile sèche renfermée dans un cylindre de verre, et posée horizontalement sur un support en bois; les pôles sont garnis de deux plaques de laiton qui s'élèvent en se rapprochant, et restent parallèles dans une longueur de trois pouces. Une cage de verre qui enveloppe cet appareil est percée de manière à laisser passer un fil de laiton, qui suspend une lame d'or de deux à trois pouces de longueur au milieu de l'intervalle des lames de cuivre, et parallèlement à leur direction; le fil de cuivre au delà de la cage est renfermé dans un tube de verre, et se termine par un bouton sur lequel on visse un condensateur de neuf pouces de diamètre. La plus faible quantité d'électricité développée dans le plateau collecteur produisant dans la feuille d'or de l'électricité libre et opposée par la séparation des plateaux, elle cesse alors d'être également attirée par les deux plaques de laiton, et se rapproche de celle dont l'électricité est contraire à celle qu'elle a reçue. La sensibilité de cet appareil est telle que, d'après M. Becquerel, dans un temps sec, un tube de verre frotté avec du drap agit sur cet instrument à une distance de dix pieds; mais les variations d'intensité qu'éprouvent les tensions des piles sèches et le décroissement de cette intensité avec le temps rendent la sensibilité de cet appareil très-variable.

1045. M. Rousseau a appliqué les piles sèches à la détermination de la facult conductrice des différents corps. L'appareil (*fig.* 582) est formé d'un gâteau de résine AB, sur lequel est fixé un conducteur en cuivre CA terminé au centre du plateau par une tige conductrice CN, qui s'effile en une pointe aiguë sur laquelle repose une aiguille faiblement aimantée DO, dont l'extrémité est garnie d'un disque de cuivre O. Le conducteur CA porte une tige de cuivre verticale mobile autour de la charnière i, et garnie, à la hauteur de l'aiguille d'une boule O'; l'extrémité du conducteur CA reçoit une petite capsule métallique, destinée à contenir le liquide ou le corps dont on veut éprouver la faculté conductrice; enfin, à une certaine distance du plateau, se trouve une pile sèche communiquant par sa base avec le sol, et garnie à son sommet d'une tige métallique qui plonge dans le vase sans en toucher les parois. Le plateau est recouvert d'une cloche portant à la hauteur de l'aiguille un cercle divisé. Pour se servir de cet instrument, on enlève le fil ab, et on tourne la cage de manière que le disque de l'aiguille touche la boule O'; ensuite on place dans la capsule A le corps sur lequel on doit opérer, et on le fait toucher par le fil ab: si le corps est bon conducteur, le disque O est repoussé par la boule O', parce que tous deux sont électrisés de la même manière. M. Rousseau a ainsi reconnu que les huiles de graines conduisent bien l'électricité, que l'huile d'olive ne la conduit presque pas; mais qu'en ajoutant à cette dernière une très-petite quantité d'huile de graine, elle devient conductrice. Cet appareil présente alors un très-bon moyen pour reconnaître les huiles d'olive falsifiées; mais il ne donne pas la mesure de la quantité d'huiles de graines qu'elles renferment. M. Rousseau a constaté que les charbons employés avec le plus de succès dans la fabrication de la poudre à canon sont en général les plus mauvais conducteurs.

§ III. *Effets mécaniques produits par les courants sur les corps qu'ils traversent.*

1046. Lorsqu'un vase est divisé en deux compartiments par une cloison verticale,

Digitized by Google

faite avec une membrane de vessie ou avec une feuille de papier enduite d'albumine coagulée par la chaleur, et que l'on met un liquide peu conducteur à la même hauteur dans les deux compartiments, en faisant plonger le fil positif d'une pile de 80 paires dans l'un d'eux et le fil négatif dans l'autre, en peu d'instants le liquide cesse d'être de niveau : il s'élève dans le vase où plonge le fil négatif. Cette observation a été faite par M. Porrett en 1816. On peut la vérifier d'une manière très-commode en fermant un tube par un fragment de vessie, le plongeant dans un vase ouvert renfermant un liquide quelconque conducteur, introduisant ce liquide dans le tube à la même hauteur, et faisant plonger les fils polaires dans le vase et dans le tube : après 15 ou 20 minutes, la différence de niveau peut être de plusieurs pouces. C'est d'après ces expériences que plusieurs physiciens ont pensé que l'électricité pourrait bien être la cause des phénomènes d'endosmose (Ier vol., pag. 112).

Lorsque dans un syphon renversé on met du mercure jusqu'à une hauteur de 3 à 4 pouces, et une dissolution saline dans la branche où l'on fait plonger le fil positif, la dissolution finit bientôt par passer en totalité dans l'autre branche. Si on plonge dans de l'eau acidulée deux tubes de verre verticaux, fermés chacun à la partie inférieure par un bouchon percé d'un grand nombre de trous, et renfermant de l'argile humide (*fig.* 583), en faisant communiquer les tubes avec les pôles d'une pile, l'argile renfermé dans le tube positif s'écoule dans le vase.

1047. Les liquides superposés à travers lesquels on fait passer des courants éprouvent encore des mouvements d'une autre nature, qui ont été observés par MM. Ermann, Davy, Serullas, Herschell ; on n'en connaît encore ni la cause ni les lois. On peut constater ces mouvements en mettant au fond d'une capsule de porcelaine du mercure et un peu d'eau acidulée ; en faisant communiquer avec l'eau et avec le mercure des fils polaires d'une pile, les liquides éprouvent des mouvements qui varient avec la nature du pôle qui les touche : quand le mercure est en contact avec le pôle positif, sa surface se ternit rapidement, et elle devient brillante quand on établit sa communication avec l'autre pôle.

§ IV. *Actions des courants les uns sur les autres et sur les aimants.*

1048. En 1819, M. Œrsted découvrit ce fait important : un conducteur à travers lequel passe un courant électrique agit sur l'aiguille aimantée et y produit une déviation qui dépend du sens du courant et de la position du conducteur relativement à l'aiguille. Cette découverte ouvrit une nouvelle carrière aux recherches physiques. MM. Biot et Savart déterminèrent les lois de ces effets ; M. Ampère découvrit l'action des conducteurs les uns sur les autres, l'action de la terre sur les conducteurs mobiles, et parvint à établir une théorie qui lie ces deux ordres de phénomènes entre eux et avec ceux que présente le magnétisme.

Dans un ouvrage élémentaire il serait impossible de suivre l'ordre chronologique des découvertes ; cette méthode n'aurait point d'ailleurs l'avantage de montrer la liaison des faits. Nous les décrirons en suivant l'ordre de dépendance établie par M. Ampère ; mais auparavant il est nécessaire de définir ce que nous entendons par la direction du courant.

1049. Lorsque les deux extrémités d'une pile sont en contact par un fil conducteur (*fig.* 584 et 585), les deux espèces d'électricité développées aux extrémités de la pile se neutralisent dans le conducteur. On ne sait pas si le transport de l'électricité a lieu par une suite de décompositions, et de recompositions successives dans chaque molécule, comme lorsque l'électricité à haute tension parcourt une série de petits corps conducteurs très-voisins, ou si le conducteur est parcouru seulement par un seul

Digitized by Google

fluide, celui qui éprouve le moins de résistance ; quoi qu'il en soit, on donne le nom de courant à cette disposition particulière de l'électricité dans le fil conducteur, et on désigne par direction du courant celle de l'électricité positive. Dans la pile le courant est dirigé du pôle cuivre au pôle zinc, et dans le conducteur, du pôle zinc au pôle cuivre. Mais il faut remarquer que dans les piles disposées suivant la méthode de Wollaston (*fig.* 385), les plaques extrêmes ne servent que de conducteurs, par conséquent le courant a lieu dans le fil de la dernière plaque cuivre à la dernière plaque zinc. Si la pile était composée d'un seul élément (*fig.* 386), le courant serait en sens contraire, c'est-à-dire du cuivre au zinc : en effet, soit *abcd* le fil de cuivre qui communique en *a* à la plaque de cuivre immergée, et en *d* à la plaque de zinc; la décomposition de l'électricité a lieu en *d*, l'électricité positive suit la plaque de zinc et l'électricité négative le fil de cuivre dans le sens *dcba*. Ainsi, d'après notre définition, le courant a lieu de *a* en *d* par *b* et *c*.

Actions des courants les uns sur les autres.

Nous commencerons par exposer les principaux résultats de l'expérience en décrivant les procédés qui ont été employés pour les vérifier ; ensuite nous examinerons les différentes conséquences qui en résultent.

1050. *Les parties consécutives d'un même courant exercent entre elles une action répulsive.* Ainsi (*fig.* 387) *mn* et *m'n'* étant des portions voisines d'un même courant, si le conducteur *MN* était tellement disposé que les parties *mn* et *m'n'* pussent se séparer sans que le courant cessât de les traverser, ces deux parties tendraient à s'éloigner l'une de l'autre.

Pour démontrer ce fait par expérience, on prend un vase plat *ABCD* (*fig.* 388) en verre ou en porcelaine, que l'on sépare en deux parties dans toute sa longueur par une cloison de verre fixée avec du mastic. On verse du mercure dans les deux moitiés du vase et on place sur le mercure le conducteur *abcde* (*fig.* 389) de manière que les deux branches parallèles *ab* et *ed* soient parallèles à la cloison, et que l'arc vertical passe par dessus cette même cloison. Le fil conducteur est recouvert de soie afin que le courant ait lieu dans toute la longueur des branches horizontales. On plonge alors dans le mercure et sur le prolongement des fils *ab* et *ed* deux fils épais communiquant avec les extrémités d'une pile : le courant électrique suit la direction *ab*, il monte par l'arc *bcd*, revient par le fil *de*; au moment de l'immersion, le conducteur s'éloigne parallèlement à lui-même jusqu'à ce qu'il soit arrêté sur les bords opposés du vase.

1051. *Deux courants parallèles s'attirent s'ils sont dirigés dans le même sens et se repoussent s'ils sont dirigés en sens contraire* (*fig.* 390, 391). On emploie pour constater cette action l'appareil (*fig.* 392), qui est formé de deux vases annulaires, placés au-dessus l'un de l'autre; les deux douilles sont traversées par une tige verticale, terminée supérieurement par une petite capsule, dans laquelle repose la pointe d'une tige de verre *ab*; à une de ses extrémités est enroulé un fil de cuivre, dont les bouts plongent dans l'eau acidulée des deux vases annulaires *MN* et *PQ*, et l'autre porte un contre-poids; deux lames de cuivre *vv*, soudées à la tige *xy*, plongent dans l'eau acidulée du vase *MN*: en mettant la tige *xy* en communication avec le pôle positif d'une pile, et le vase *PQ* en contact avec l'autre, le courant traverse l'eau acidulée du vase *MN*, suit le conducteur vertical et traverse l'eau acidulée du vase inférieur; si alors on approche un conducteur vertical fixe, le courant vertical mobile est porté en avant ou en arrière, suivant le sens des courants. On peut aussi employer d'autres appareils, dont nous parlerons plus loin.

Digitized by Google

1052. ***Les courants angulaires s'attirent quand ils vont tous deux en s'approchant ou en s'éloignant du sommet de l'angle, et ils se repoussent quand l'un s'approche et que l'autre s'éloigne du sommet de l'angle.*** Ainsi, dans la fig. 393, il y a attraction, et dans la fig. 394 il y a repulsion. Il resulte de là que quand deux courants indéfinis *AB* et *CD* (*fig.* 395) se coupent au point *O*, il y a attraction dans deux angles opposés par leurs sommets, et répulsion dans les deux autres : par conséquent, si l'un des courants ou tous deux sont mobiles autour d'un axe vertical passant par le point *O*, ils se placeront parallèlement, de manière que les courants soient dirigés dans le même sens. Pour que ces actions se manifestent il n'est point nécessaire que les courants soient dans un même plan, ils peuvent être disposés d'une manière quelconque dans l'espace; mais alors il faut prendre leur perpendiculaire commune pour le sommet de l'angle.

Pour constater ce fait par l'expérience, la disposition la plus simple est celle représentée *fig.* 396. *AB* et *CD* sont deux vases annulaires concentriques renfermant de l'eau acidulée; au centre s'élève une tige *ab*, terminée par une petite capsule dans laquelle repose une pointe soudée au conducteur horizontal *MN* dont les deux extrémités recourbées plongent chacune dans le liquide acidulé d'un des vases annulaires : en mettant un de ces vases en contact avec le pôle positif d'une pile, l'autre en communication avec l'autre pôle, et en approchant de *MN* un fil de cuivre *PQ* communiquant avec les pôles de la même pile ou d'une pile différente, le courant mobile se dirige parallèlement au courant fixe et de manière que l'électricité le parcourt dans le même sens. On peut encore vérifier le fait dont il s'agit par d'autres dispositions que nous décrirons plus loin.

1053. ***Un courant quelconque exerce sur un autre la même action qu'un conducteur sinueux qui s'écarte très-peu de la direction du premier.***

On peut vérifier ce fait en prenant un fil de cuivre recouvert de soie dans toute son étendue, disposé en ligne droite sur une certaine longueur, et que l'on fait revenir en sens contraire en faisant un grand nombre de sinuosités autour de sa première direction (*fig.* 397) : en mettant les deux extrémités *a* et *b* du fil en communication avec les extrémités d'une pile et en le plaçant parallèlement au conducteur mobile de l'appareil 392, ce dernier n'éprouve aucune déviation : par conséquent la partie sinueuse du courant fixe, qui agit en sens contraire de la partie rectiligne, exerce une action égale. Il suit de là que l'on peut remplacer une portion quelconque de courant *mn* (*fig.* 398) par les deux petits courants *mx* et *nx*, ou par un nombre quelconque de petits courants *mx*, *xy*, *yz*, *zn* (*fig.* 399), formant un polygone dont *mn* est un des côtés et ayant la même intensité : cette substitution de plusieurs petits courants à un seul est analogue à la décomposition des forces en Statique.

A l'aide de ces faits, nous pouvons déterminer la nature des effets produits par des courants indéfinis ou circulaires qui agissent sur des courants finis disposés de différentes manières.

1054. ***Action d'un courant indéfini sur un courant fini mobile autour d'un axe perpendiculaire à sa direction.*** Soit *OA* (*fig.* 600) le courant fini, mobile dans un plan autour du point *O*. Il peut arriver trois cas : le courant indéfini peut couper l'axe de rotation, être situé au delà du cercle décrit par l'extrémité *A* du courant, ou être placé à une distance plus petite que *OA*. Dans le premier cas, nous savons déjà que le courant *OA* se dirigera parallèlement au courant indéfini, de manière que le mouvement de l'électricité ait lieu dans le même sens.

Dans le second cas, soit *MN* (*fig.* 601) le courant indéfini : dans la position *OA* du courant mobile, il est attiré par le courant *MN*, il prendra alors la position *OA'*; dans cette nouvelle position, ce courant est repoussé par la portion du courant indé-

Digitized by Google

fini *nN*, puisque l'un va en s'approchant et l'autre en s'éloignant du sommet *n* de l'angle formé par leurs directions, et il sera attiré par la partie *nM* du courant indéfini, puisque dans l'angle *OnM* les courants vont tous deux en s'approchant du sommet de l'angle : ainsi ces deux forces concourront à faire marcher le courant dans le même sens. Il est facile de voir par les mêmes raisonnements que le courant prendra successivement les positions *OA''*, *OA'''*..., *OA*^{VII}, et qu'il aura un mouvement continu de rotation. Si le courant fini, au lieu d'être dirigé du centre à la circonférence, était dirigé en sens contraire (*fig.* 602), le mouvement de rotation aurait encore lieu, mais le sens du mouvement serait opposé, et il serait le même si le sens du courant indéfini était changé en même temps. Nous conclurons de là que, quand un courant fini, mobile dans un plan autour d'une de ses extrémités, est soumis à l'action d'un courant indéfini placé à une distance de l'axe de rotation plus grande que la longueur du courant mobile, ce dernier prend un mouvement continu de révolution en sens contraire du mouvement de l'électricité dans le courant indéfini quand l'électricité dans le courant fini se meut du centre à la circonférence, et dans le même sens quand il va de la circonférence au centre.

Ce mouvement sera uniforme si le courant *MN* est très-éloigné ; mais, s'il est très-voisin du courant mobile, il est évident que la vitesse du mouvement variera avec la position du courant mobile relativement au courant indéfini.

Enfin, dans le troisième cas (*fig.* 603), lorsque le courant est placé entre le centre et la circonférence, soit *MN* la direction du courant indéfini fixe, dont la projection horizontale coupe le conducteur mobile au point *B*, il y aura répulsion dans l'angle *OBN*, et attraction dans l'angle *MBO* : la résultante de ces deux forces tendra à faire mouvoir le conducteur mobile dans la direction *ba* ; mais d'un autre côté, l'attraction de l'angle *ABN* et la répulsion de l'angle *ABM* auront pour résultante une force qui tendra à faire tourner le courant *OA* en sens contraire, et qui aura sur la première force l'avantage d'agir par un plus grand bras du levier. Lorsque les moments de ces deux forces seront égaux, *OA* se trouvera en équilibre. On doit donc, en approchant lentement du centre un conducteur horizontal *MN*, placé d'abord un peu au delà de *OA*, trouver un point où le mouvement de rotation continu cesse pour faire place à une position d'équilibre, qui sera d'autant plus rapprochée du diamètre *CD*, parallèle au conducteur fixe, que celui-ci sera plus près du centre. Dans ce qui précède nous avons supposé les courants dans le même plan ; mais les effets seraient les mêmes, à l'intensité près, si le courant indéfini était au-dessus ou au-dessous du plan que peut parcourir le courant fini.

Si le courant fini était mobile autour de son milieu (*fig.* 604), le mouvement de rotation n'aurait plus lieu, parce que chaque moitié tendrait à tourner en sens contraire. Il prendrait une position d'équilibre stable dans laquelle il serait parallèle au courant indéfini, et le mouvement de l'électricité dans le même sens. L'équilibre pourrait aussi exister dans la position indiquée par la fig. 604 *A*, mais l'équilibre serait instable.

Pour constater ces faits, on se sert d'un vase *ABCD* (*fig.* 605), dont le centre est garni d'une douille ouverte par les deux bouts ; on place dans cette douille une tige métallique terminée par une petite capsule *s*, et on y suspend le conducteur *fig.* 606 ; on remplit le vase d'eau acidulée dans laquelle plonge l'anneau *abc* qui termine le conducteur, et on fait communiquer la tige *xy* avec une des extrémités de la pile et le vase avec l'autre ; en supposant que la tige *xy* communique avec le pôle zinc, le courant est alors disposé dans le conducteur mobile comme l'indiquent les flèches : alors en soumettant le courant mobile à l'action d'un courant fixe placé à une petite distance, le conducteur mobile tourne d'une manière continue dans le sens du

Digitized by Google

courant extérieur si le courant dans le conducteur mobile va de la circonférence au centre, et en sens contraire si le courant est dirigé du centre à la circonférence. La terre, comme nous le verrons plus tard, agit de la même manière que si elle était parcourue par un courant dirigé de l'est à l'ouest et principalement accumulé vers l'équateur; alors ce courant terrestre tend à faire tourner le courant mobile; mais on reconnaîtra que le mouvement est dû au courant rectiligne, quand, en y changeant le mouvement de l'électricité, le sens du mouvement changera aussi.

1055. *Action d'un conducteur circulaire sur un courant fini, situé dans le même plan ou dans un plan parallèle peu éloigné, et dont l'extrémité fixe est dans l'axe du conducteur circulaire.* Soit *MNPQ* (*fig.* 607) le courant circulaire fixe, dont le rayon est plus grand que la longueur du conducteur mobile; les parties du circuit circulaire voisines de l'extrémité du courant mobile exerçant une action plus grande que les parties opposées, il est facile de voir que le conducteur mobile se mouvra d'une manière continue autour du point *O*, et en sens contraire du mouvement de l'électricité dans le conducteur circulaire quand le courant mobile ira du centre à la circonférence, et dans le sens du mouvement du courant circulaire quand le courant mobile sera dirigé de la circonférence au centre. Si le centre du courant circulaire ne coïncidait pas avec le point autour duquel le courant mobile peut tourner, le mouvement de rotation pourrait encore exister, mais alors il cesserait d'être uniforme. Il pourrait aussi arriver que le courant mobile prît une position fixe d'équilibre ; cela arrivera quand le cercle décrit par l'extrémité *A* du conducteur mobile coupera le courant circulaire.

Si le courant fini était mobile autour de son milieu, situé sur l'axe du courant circulaire (*fig.* 608), chaque moitié tendrait à tourner en sens contraire avec la même force, par conséquent le courant serait en équilibre dans toutes les positions.

Si, dans le premier cas, le courant rectiligne était fixe et le courant circulaire mobile autour de son centre, il prendrait un mouvement contraire, c'est-à-dire qu'il marcherait dans le sens de l'électricité si le courant fini allait du centre à la circonférence, et en sens contraire si l'électricité allait de la circonférence au centre. Si le courant rectiligne était extérieur au cercle (*fig.* 609), le courant circulaire se mouvrait dans un sens opposé au mouvement produit par un courant intérieur, et si c'était le courant rectiligne qui fût mobile, son mouvement serait contraire à ce qu'il serait s'il était intérieur au cercle.

Pour vérifier ces faits, on emploie le vase annulaire *fig.* 605 et le conducteur mobile *fig.* 606, et on environne le vase du conducteur spiral *fig.* 610 : la rotation se fait dans le même sens qu'avec un courant rectiligne indéfini ; mais il est uniforme. Dans cette expérience, les parties verticales du conducteur mobile concourent avec les parties horizontales pour produire la rotation ; mais en les faisant très-courtes on peut rendre leur influence insensible. La terre agit encore comme dans les expériences précédentes pour produire la rotation ; mais on constate que l'effet est dû au courant circulaire lorsqu'en changeant le sens du courant dans le conducteur circulaire, la direction du mouvement de rotation est également changée.

Pour constater la rotation des courants circulaires par les courants rectilignes, on suspend dans la coupe *s* (*fig.* 605) le conducteur *fig.* 611, composé d'un fil de cuivre *abc* plié en spirale, dont les spires sont maintenues dans un même plan par trois petites règles de fanon de baleine; l'extrémité intérieure de la dernière spire se recourbe verticalement, et sert à suspendre le conducteur. Le courant arrivant par *s*, par exemple, suit les contours de la spirale, d'où il sort par tous les points pour atteindre les parois du vase; et ce sont alors les courants qui traversent l'eau qui agissent sur la spirale : on voit cette dernière se mouvoir dans le sens *abc*, c'est-à-

Digitized by Google

dire en rétrogradant. Si on fait arriver le courant par les parois du vase, il parvient à la spirale par l'eau acidulée en se rapprochant du conducteur, et la spirale se meut dans le sens du courant, et par conséquent le sens du mouvement est encore le même que précédemment. C'est d'ailleurs ce qu'il était facile de prévoir, parce que le sens du courant est changé à la fois dans les deux conducteurs. Pour changer la direction du mouvement, il faut substituer à la spirale *fig.* 611 la spirale *fig.* 612, dans laquelle le fil est plié en sens contraire.

M. Savary a disposé l'appareil d'une manière différente. Les fig. 613 et 614 représentent deux petits conducteurs mobiles, semblables à celui de la fig. 606, mais qui en diffèrent en ce que une des deux tiges verticales *h* est formée d'une matière isolante, et que la couronne *abcd* est interrompue à droite ou à gauche du conducteur vertical par une petite lame d'ivoire : quand on place l'un de ces conducteurs mobiles dans la coupe *s* de la *fig.* 605, de manière que l'anneau plonge dans l'eau acidulée, le conducteur mobile tourne d'un mouvement continu qui a lieu dans le même sens, soit que le courant monte ou descende dans le conducteur vertical. Cet effet provient évidemment, comme dans les expériences précédentes, des courants qui traversent l'eau acidulée pour se rendre dans la paroi du vase : en effet, quand le courant descend par *xy* (*fig.* 613), il parcourt le cercle dans la direction *abcd* et sort par chacun de ses points. Si nous désignons par *fz* un de ces courants, il tend à faire tourner le cercle dans le sens *cba* puisqu'il s'en éloigne ; mais si le courant venait de l'eau acidulée, le courant dans le cercle aurait lieu dans le sens *dcba :* alors le cercle devrait se mouvoir dans le sens du courant dans ce conducteur, c'est-à-dire dans le sens *cbad,* qui est le même que précédemment. Mais le sens du courant serait changé si on employait le conducteur mobile *fig.* 614.

1056. *Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant fini perpendiculaire à sa direction.* Soit *AB* (*fig.* 615) un courant vertical fini, placé au-dessus et derrière un conducteur indéfini *MN :* je dis que le conducteur vertical ne peut se mouvoir que parallèlement à lui-même, dans un plan parallèle à *MN*. En effet, soit *BP* la plus courte distance des deux courants ; en supposant que les courants soient dirigés comme l'indiquent les flèches, l'action de la partie *MP* sera répulsive, et celle de la partie *PN* sera attractive ; si on prend deux points *m* et *n* également éloignés de *P,* leurs actions sur un point *a* de *AB* pourront être représentées par les lignes *ax* et *ay,* et comme ces forces sont égales, leur résultante *az* sera parallèle à *MN*. Il est facile de voir que, si le courant était ascendant dans *AB* (*fig.* 616), le mouvement se ferait toujours parallèlement à *MN ;* mais il aurait lieu en sens contraire. Cet effet est dû à ce que le conducteur *AB* n'est pas prolongé au delà du point *B :* car la partie qui serait située au-dessous aurait un mouvement contraire, et le courant tournerait autour du point *B*.

On peut énoncer ces deux faits de la manière suivante : un courant terminé qui s'approche d'un courant indéfini tend à marcher en sens inverse de ce dernier ; un courant terminé qui s'éloigne d'un courant indéfini tend à marcher dans le sens de ce dernier.

Réciproquement, un conducteur mobile indéfini, soumis à l'action d'un conducteur fini fixe, marche dans le sens de l'électricité lorsque le courant va en s'approchant du conducteur indéfini, et en sens contraire lorsque le courant terminé va en s'en éloignant.

Il résulte de là que, si un conducteur fini vertical *AB* (*fig.* 616 *A*), mobile autour d'un axe vertical *oo'*, est soumis à l'action d'un courant horizontal indéfini *MN*, situé au-dessous dans un plan passant par l'axe *oo'* ou en avant de cet axe, le plan *AB oo'* se dirigera parallèlement à *MN* de manière que *AB* soit en avant de *oo'* si le courant

Digitized by Google

tend à s'éloigner de *MN*, et en arrière (*fig.* 617) si le courant se meut vers *MN*. Si deux courants *AB* et *A'B'* (*fig.* 618), mobiles autour de la droite *oo'*, étaient dirigés en sens contraire, le plan *ABA'B'* se dirigerait parallèlement à *MN*, et les actions exercées par le courant *MN* sur les deux courants finis concourraient à produire cet effet. Enfin, si les deux courants *AB* et *A'B'* (*fig.* 619 et 620), toujours mobiles autour de *oo'*, étaient dirigés dans le même sens, les deux courants finis seraient sollicités en sens contraire par le courant *MN*, et le plan *ABA'B'* resterait en équilibre dans toutes les positions possibles, si le courant *MN* était assez éloigné pour que les distances de ce courant aux points *B* et *B'* fussent sensiblement égales dans toutes les positions possibles du plan *ABA'B'*, ou s'il passait par un point de la ligne *oo'*. Si le courant *MN* est à côté de l'axe et à une distance finie, le plan *AB A'B'* se dirigera parallèlement à *MN*; mais l'équilibre ne sera stable que dans une seule direction d'un très-petit mouvement imprimé. Si *MN* coupait le cercle que décrit le point *B*, le plan *ABA'B'* prendrait une direction plus ou moins inclinée à *MN*.

On peut facilement vérifier ces faits au moyen de l'appareil *fig.* 592, en plaçant au-dessous du réservoir annulaire *PQ* un courant horizontal; le courant vertical se dirige comme la théorie l'indique.

1057. *Action d'un courant circulaire sur un courant fini perpendiculaire à son plan.* Si un courant *AB* (*fig.* 621) fini, vertical, et mobile autour de l'axe vertical *oo'*, est soumis à l'action d'un courant circulaire *MNPQ*, le courant vertical prendra un mouvement de rotation autour de *oo'*, en sens contraire du mouvement de l'électricité dans le courant circulaire si les deux courants tendent à s'approcher, et dans le même sens s'ils tendent à s'éloigner. Lorsque deux courants verticaux *AB*, *A'B'* (*fig.* 622) seront dirigés dans le même sens autour d'un axe vertical, les mouvements auront lieu de la même manière, et les actions exercées par le courant circulaire sur les deux courants verticaux concourront à produire cet effet; mais si les deux courants (*fig.* 623) étaient dirigés en sens contraire, les actions exercées par le courant circulaire sur les deux courants verticaux se détruiraient, et le plan *ABA'B'* resterait en équilibre dans toutes les positions possibles.

1058. *Action d'un courant indéfini horizontal sur un système de courants horizontaux et verticaux.* Considérons maintenant un système de courants horizontaux et verticaux (*fig.* 624 et 625), dans lequel les deux portions de courants horizontaux sont dirigées en sens contraire, et les courants verticaux dirigés dans le même sens, soumis à l'action d'un courant indéfini placé latéralement. Il est évident, d'après ce qui précède, que, si le courant indéfini est à une très-grande distance, les actions sur les courants verticaux se détruiront, et il ne restera que l'action sur les courants horizontaux, action qui, comme nous l'avons vu, tend à faire tourner le conducteur avec un mouvement continu.

Si les courants verticaux étaient en sens contraire, les courants horizontaux dans le même sens (*fig.* 626 et 627), le courant indéfini passant par l'axe *oo'* ou à une distance plus grande que *Bo'*, son action tendrait à donner aux courants mobiles une position fixe d'équilibre; elle pourrait être la même pour les courants horizontaux et verticaux, et elle pourrait être différente : dans les *fig.* 626 et 627 elle est évidemment différente. S'il existait des courants horizontaux en sens contraire (*fig.* 628 et 629), disposés de telle sorte que les deux courants horizontaux et les deux courants verticaux fussent opposés, l'action du courant indéfini, en le supposant à une très-grande distance, ne se manifesterait que sur les courants verticaux. S'il existait quatre courants horizontaux opposés (*fig.* 630 et 631), et deux courants verticaux dirigés dans le même sens, le système des courants serait complétement astatique, c'est-à-dire resterait en équilibre dans toutes les positions possibles : le même effet

Digitized by Google

aurait lieu par la disposition indiquée *fig.* 632. Et comme chaque élément curviligne de courants peut être remplacé par deux éléments rectilignes perpendiculaires entre eux, on voit qu'un courant circulaire (*fig.* 633) mobile autour de l'axe oo', soumis à l'action d'un courant indéfini placé à une grande distance, se dirigerait parallèlement au courant indéfini, de manière que la branche ascendante serait en avant du courant, comme les systèmes de courants *fig.* 628 et 629, et que les systèmes de courants *fig.* 634 et 635 seraient également astatiques.

Pour soumettre des circuits complets à l'action des courants de différente nature, on emploie l'appareil suivant. LL' (*fig.* 636) représente une table en bois, que l'on rend horizontale au moyen des quatre vis v, v, v, v; AB et EF sont deux colonnes en cuivre qui se recourbent horizontalement. Les parties CD et FG sont séparées par une lame d'ivoire, qui conduit assez mal l'électricité pour que le courant ne puisse pas passer de l'une à l'autre; elles se terminent par les deux coupes en cuivre x et y, dont les axes sont placés dans la même verticale; au fond des capsules sont mastiqués de petits godets en verre. R et R' sont deux rainures pratiquées dans le plateau; elles sont remplies de mercure, et reçoivent les deux fils qui communiquent avec les extrémités de la pile; nous supposerons que le pôle positif communique avec R. m, m', n et n' sont quatre cavités creusées dans le plateau et également pleines de mercure; les cavités m et n communiquent, la première avec la tige AB, et la seconde avec la tige DE; de plus, les cavités mn' et $m'n$ communiquent entre elles par des lames de cuivre couchées sur la table; au point de croisement de ces lames, elles sont séparées par une lame de matière non conductrice. D'après cette disposition, si on fait communiquer m' avec R et n' avec R', le courant montera par EF et descendra par AB, en supposant que les coupes xy soient réunies par un conducteur; mais si on fait communiquer m avec R et n avec R', le courant montera par AB et descendra par EF: ainsi le conducteur mobile, dont les extrémités reposent dans les coupes xy, sera parcouru en sens contraire dans ces deux circonstances. Pour effectuer la communication dont nous venons de parler, on pourrait employer des fils de cuivre recourbés, que l'on placerait convenablement; mais on se sert pour cet effet d'une bascule représentée *fig.* 637. Elle est mobile autour d'un axe ss'; aux deux extrémités se trouvent deux petites plaques en cuivre, fixées à l'axe, et terminées par des appendices destinées à être plongées simultanément dans les cavités Rm, nR', ou Rm', $n'R'$. On voit, d'après cette disposition, qu'en inclinant la bascule à droite le courant monte par EF, et qu'en l'inclinant à gauche il monte par AB.

On suspend dans les coupes x et y (*fig.* 636) les extrémités d'un conducteur formé d'un seul fil de cuivre recourbé de différentes manières suivant l'effet qu'on veut obtenir, et on place au dessous le conducteur *fig.* 638, formé d'une seule lame de cuivre recouverte de soie, faisant plusieurs tours sur un cadre en bois : alors on peut faire passer le même courant d'abord par le conducteur fixe, et ensuite par le conducteur mobile; ou bien on peut le faire passer en même temps par les deux conducteurs. Dans le premier cas, la disposition serait un peu compliquée; dans le second, il suffit de faire plonger les extrémités t et u du fil conducteur *fig.* 638 dans les réservoirs R et R'. La première disposition n'est nécessaire que quand les courants qui passent par les conducteurs fixes et les conducteurs mobiles doivent avoir la même intensité; en général, il est plus commode d'employer la seconde, qui est beaucoup plus simple. Le conducteur fixe est replié plusieurs fois sur lui-même afin que son action soit augmentée; les lames sont séparées les unes des autres par une matière isolante, afin que le courant parcoure toute la longueur du circuit.

Si on place dans les godets x et y les extrémités du conducteur *fig.* 639, on trouve qu'il reste en équilibre stable dans toutes les positions possibles; le conducteur

Digitized by Google

mobile *fig.* 640 se dirige par les actions exercées sur le courant inférieur nq et sur les courants verticaux mn et pq. Ce dernier deviendrait astatique comme le premier, si le courant était situé à une distance assez grande pour que les actions exercées sur les courants horizontaux fussent sensiblement égales.

1059. *Action d'un courant circulaire sur un système de courants horizontaux et verticaux.* Considérons maintenant un système de courants horizontaux et verticaux mobiles autour d'un axe vertical oo', soumis à l'influence d'un courant circulaire placé dans un plan horizontal (*fig.* 641) : si les courants sont disposés comme l'indiquent les flèches, leur système prendra un mouvement de rotation continu en sens contraire du courant circulaire, et l'action du courant circulaire sur tous les courants mobiles tendra à produire le même effet ; mais si les deux courants verticaux étaient en sens contraire, le mouvement de rotation ne serait produit que par les courants horizontaux; et enfin, si dans chacun des courants horizontaux les deux parties étaient dans le même sens et les courants verticaux en sens contraire (*fig.* 641 *A*), l'appareil serait astatique.

Supposons, en dernier lieu, un système de courants formant un circuit recourbé deux fois à angle droit et terminé à l'axe oo' (*fig.* 642) : les courants horizontaux tendent à prendre des mouvements de rotation contraires, et, comme le courant inférieur est plus voisin du courant circulaire, l'action de ce dernier l'emportera; mais, d'un autre côté, l'action exercée sur le courant vertical tend à produire un mouvement de rotation en sens contraire de celui du courant horizontal inférieur : par conséquent on ne peut pas, à l'aide des considérations qui précèdent, déterminer la nature de l'effet qui sera produit. Mais l'expérience démontre que l'action est nulle et que le système des courants reste en équilibre dans toutes les positions possibles, et que cet équilibre a également lieu, quelles que soient la courbure et les sinuosités du courant, pourvu que ses deux extrémités soient dans l'axe de rotation. Si la courbe était fermée, le courant $MNPQ$, étant sans action sur chaque moitié, serait également sans action sur leur ensemble. Ainsi nous pourrons établir en principe qu'un courant circulaire n'exerce aucune action sur un courant fini dont les deux extrémités sont dans un axe perpendiculaire au plan du courant circulaire et passent par son centre (*fig.* 643), ou sur un courant fermé qui passe par cet axe; et, comme l'action est toujours égale à la réaction, il en résulte aussi qu'un circuit fermé, d'une forme quelconque et fixe, est sans action pour faire tourner un cercle autour de son axe lorsque cet axe coupe le circuit fixe en deux points.

On peut vérifier ces derniers faits en suspendant dans les coupes x et y (*fig.* 636) les conducteurs mobiles *fig.* 639, 640 et 641, et plaçant autour le conducteur en spirale *fig.* 610; tous restent parfaitement immobiles dans une position quelconque.

1060. *Détermination de l'action de deux éléments de courants.* Les actions que les courants exercent les uns sur les autres résultent nécessairement de celles de leurs éléments; et, les actions des courants étant toujours attractives ou répulsives, il doit en être de même de celles des éléments, et ces dernières doivent être dirigées suivant les droites qui joignent leurs milieux : alors, en désignant par i et i' les intensités des courants auxquels appartiennent les éléments, par ds, ds', leurs longueurs, par φ l'angle formé par le second avec le plan qui contient le premier et la droite qui joint leurs milieux, et par θ et θ' les angles qu'ils forment avec cette droite, l'action des deux éléments sera proportionnelle aux produits des intensités des deux courants, aux produits de la longueur des éléments, à une fonction inconnue des angles θ, θ' et φ, et en raison inverse d'une certaine puissance n de la distance : ainsi elle sera représentée par

$$\frac{ii'ds\,ds'}{r^n} f(\theta, \theta', \varphi).$$

Digitized by Google

La nature de la fonction f peut facilement être déterminée par les faits que nous avons rapportés. Il résulte d'abord de ces faits que l'action d'un élément de courant sur un autre élément placé d'une manière quelconque dans un plan élevé perpendiculairement à la direction du premier, et par son milieu, est nulle. En effet, si on suppose que le premier élément se meuve dans sa direction, l'action changera de signe quand il passera d'un côté à l'autre du plan : par conséquent l'action devra être nulle quand son milieu sera dans le plan. Cela posé, considérons deux éléments mm', nn' (*fig.* 645), dont les milieux sont en a et b; nous pouvons remplacer chacun des éléments par ses projections sur la ligne ab et dans une direction perpendiculaire : les longueurs des deux premières projections sont évidemment $ds \cos \theta$ et $ds' \cos \theta'$, et celles des deux dernières sont $ds \sin \theta$ et $ds' \sin \theta'$. D'après ce qui précède, les actions de la première composante sur la quatrième, ainsi que celles de la deuxième sur la troisième, étant nulles, il ne reste que celles des composantes qui sont dirigées suivant ab et perpendiculairement à cette direction. L'action des deux premières étant $ds ds' \cos \theta \cos \theta'$, il ne reste à trouver que l'action des deux dernières : pour cela projetons l'élément $ds \sin \theta$ dans le plan qui passe par l'élément mm' et par ab; la longueur de cet élément projeté sera $ds' \sin \theta' \cos \varphi$, et son action sur l'élément $ds \sin \theta$ sera

$$ds ds' \sin \theta \sin \theta' \cos \varphi.$$

Nous n'avons point à considérer l'action de l'autre composante parce qu'elle est nulle. Il semble maintenant que pour obtenir l'action totale des deux éléments mm' et nn' il suffit d'ajouter les deux actions que nous venons d'obtenir ; mais il faut remarquer que nous ne savons pas si des éléments de même longueur placés dans la même direction, ou perpendiculairement à la ligne qui joint leurs milieux et dans le même plan, sont égaux. Alors, en représentant par k le rapport de l'intensité de l'action dans le premier cas et dans le second, l'action des deux éléments sera

$$\frac{ii' ds ds'}{r} (\sin \theta \sin \theta' \cos \varphi + k \cos \theta \cos \theta'),$$

expression qui renferme deux inconnues, k et n. Ampère les a déterminées en cherchant par expérience la forme et la disposition de deux courants qui restent en équilibre par leur influence mutuelle, calculant d'après la formule leur action, et établissant l'identité entre le résultat du calcul et de l'observation : il en est résulté des équations de conditions renfermant n et k, et qui ont servi à les déterminer. Le premier cas d'équilibre dont Ampère s'est servi est celui d'un circuit fermé circulaire, et d'un circuit de forme quelconque dont les deux extrémités se terminent à la droite élevée par le centre du premier courant et perpendiculairement à son plan : ce cas d'équilibre fournit la relation $n + 2k - 1 = 0$. Le second cas d'équilibre dont Ampère s'est servi pour obtenir une autre relation entre n et k est celui-ci : supposons que CD (*fig.* 646) soit un axe mobile sur lui-même, et auquel sont fixés deux courants rectangulaires inclinés entre eux, $abcd$ et $a'b'c'd'$. Si on place entre les deux parties bc et $b'c'$ un courant fixe, en supposant que le sens du mouvement de l'électricité soit celui indiqué par les flèches, il y aura répulsion entre les courants bc et AB, $b'c'$ et AB; et les actions des courants horizontaux d'un même rectangle sur AB étant égales et de signes contraires, elles se détruiront : or, il résulte de l'expérience que, dans la position d'équilibre, les distances des courants verticaux mobiles au courant vertical fixe sont en raison inverse de leur longueur; et, comme on trouve par le calcul que, pour que cette relation existe, il faut que $n = 2$, l'équation précédente donne $k = -\frac{1}{2}$, et l'expression de l'action de deux éléments de courant devient

$$\frac{ii' ds ds'}{r^2} \left(\sin \theta \sin \theta' \cos \varphi - \frac{1}{2} \cos \theta \cos \theta'\right).$$

Il faut bien remarquer que les angles θ et θ' doivent être comptés d'un même côté de la ligne ab, et d'un même côté des éléments par rapport à l'origine des courants. Au moyen de cette

Digitized by Google

formule on pourra facilement, et dans tous les cas, déterminer la nature, la direction et l'intensité de l'action de deux courants donnés de forme et de position, en cherchant la résultante des actions de tous les éléments qui les constituent ; du moins on ne rencontrera dans la solution de ces questions que les difficultés inhérentes à l'analyse ; dans un grand nombre de cas, l'intensité de l'action pourra être déterminée exactement, et dans tous les autres on obtiendra des valeurs approchées autant qu'on le désirera.

En partant de la formule de l'action de deux éléments de courants, Ampère a découvert les faits suivants.

1061. L'action d'un conducteur rectiligne indéfini ou d'un courant circulaire sur un élément de courant situé d'une manière quelconque dans l'espace est perpendiculaire à ce petit courant.

1062. Un courant circulaire *MNPQ* (*fig.* 647) n'exerce aucune action sur un courant circulaire ou une portion quelconque de courant circulaire dont le plan est parallèle à celui du courant fermé *MNPQ*, et dont le centre se trouve sur la ligne *oo'* perpendiculaire au plan du cercle *MNPQ* et passant par son centre. Ce fait peut être facilement constaté en suspendant dans les coupes de l'appareil *fig.* 636 le conducteur mobile *fig.* 648 et plaçant autour la spirale *fig.* 610.

1063. Lorsqu'un courant qui suit une courbe plane quelconque est soumis à l'action d'un courant indéfini dans les deux sens, et se meut autour d'un axe perpendiculaire au plan de la courbe et à la direction du courant indéfini, le moment des forces est le même dans toutes les positions.

1064. Un courant formant un circuit fermé fixe ne peut jamais imprimer à un autre courant fermé un mouvement de rotation continu constamment dirigé dans le même sens.

1065. *Action des solénoïdes.* Ampère a désigné sous le nom de *solénoïde* un système de petits courants circulaires égaux, parcourus dans le même sens par l'électricité, dont les centres sont placés sur une courbe quelconque, et les plans perpendiculaires à cette courbe.

1066. L'action d'un solénoïde d'un très-petit diamètre sur un élément de courant se réduit à deux forces appliquées à l'élément, perpendiculaires à deux plans qui passent tous deux par cet élément et par chacune des extrémités du solénoïde. Chacune des forces est en raison inverse du carré de la distance à l'extrémité du solénoïde, et proportionnelle au sinus de l'angle que la droite joignant l'élément avec cette extrémité du solénoïde fait avec la direction de l'élément. Il suit de là que l'action d'un solénoïde sur un élément de courant ne dépend que de la position respective de l'élément et des extrémités du solénoïde, mais nullement de la direction et de la courbure de l'axe du solénoïde. Il en est de même de l'action d'un solénoïde sur un conducteur d'une forme et d'une grandeur quelconque : cette action ne dépend que de la position des extrémités relativement au conducteur, et reste la même quelles que soient la forme et la direction de l'axe du solénoïde.

1067. L'action d'un solénoïde sur un courant rectiligne indéfini perpendiculaire à son axe se réduit à deux forces appliquées au courant, dirigées dans un même plan perpendiculaire aux lignes qui mesurent les distances du courant indéfini aux deux extrémités du solénoïde et qui sont en raison inverse de ces distances.

Lorsqu'un solénoïde rectiligne, mobile autour de son milieu de manière à prendre autour de ce point toutes les positions possibles, est soumis à l'action d'un courant indéfini, il se dirige toujours perpendiculairement au courant de manière que la direction du mouvement de l'électricité dans les parties des éléments les plus voisines du courant soit la même que dans ce dernier.

Digitized by Google

1068. L'action d'un solénoïde sur un courant fermé se réduit à deux forces qui passent par les extrémités du solénoïde.

1069. L'action mutuelle de deux solénoïdes peut toujours être représentée par quatre forces agissant en raison inverse du carré de la distance, et dirigées suivant les lignes qui joignent deux à deux les extrémités des solénoïdes, du moins quand les distances ne sont pas très-petites, et dont deux sont attractives et deux répulsives.

Pour vérifier les actions des courants sur les solénoïdes et des solénoïdes entre eux, on prend un fil de cuivre recouvert de soie que l'on tourne en hélice et qui revient par l'axe à l'origine de l'hélice; chaque spire étant équivalente à un courant circulaire et à un petit courant rectiligne dont la longueur est égale au pas de l'hélice, il s'ensuit que l'hélice produit le même effet qu'une série de courants circulaires en même nombre que les spires et un courant rectiligne de même longueur que l'hélice : on voit d'après cela que, le courant revenant à l'origine, il ne reste que l'effet dû aux courants circulaires, projections de chaque spire sur des plans perpendiculaires à l'axe. Les conducteurs ainsi disposés portent le nom de *cylindres électro-dynamiques*. La fig. 649 représente un cylindre électro-dynamique mobile. En le suspendant aux coupes x et y de l'appareil *fig.* 636, et plaçant au-dessous un conducteur rectiligne horizontal, le conducteur mobile se dirige perpendiculairement au conducteur fixe; et en approchant des extrémités de l'appareil mobile un autre cylindre électro-dynamique (*fig.* 650), qu'on tient à la main, on peut facilement constater les attractions et les repulsions dont nous avons parlé.

1070. La direction des actions exercées par les extrémités d'un solénoïde sur un élément de courant paraît singulière au premier abord : car jusqu'ici nous avons toujours vu les attractions et les répulsions des corps s'exercer suivant une ligne passant par un point de chacun des corps ; mais on peut facilement s'en rendre compte.

Considérons deux systèmes de points matériels A et B (*fig.* 651), composés de molécules de même espèce, c'est-à-dire que celles de l'un agissent toutes par attraction ou toutes par répulsion sur celles de l'autre, avec des forces proportionnelles à leurs masses. Soient M, M', M'', etc., les molécules qui composent le premier, et m une quelconque de celles du second : en composant successivement toutes les actions ma, mb, md, exercées par M, M', M'', etc., on obtiendra des résultantes dont la dernière sera l'action du système A sur le point m, et passera à peu près par le centre d'inertie de ce système. En raisonnant de même relativement aux autres molécules du système B, on trouvera que les résultantes correspondantes passeront aussi toutes très-près du centre d'inertie du système A et auront une résultante finale CC', qui passera aussi à peu près par le centre d'inertie du système B; nous nommerons *centres d'action*, les deux points C et C', extrêmement voisins des centres d'inertie par lesquels passe cette résultante générale : il est évident qu'elle ne tendra à imprimer à chaque système qu'un mouvement de translation, à cause des petites distances des centres d'action aux centres d'inertie.

Supposons, en second lieu, que, les molécules du second système restant toutes de même espèce, celles du premier soient les unes attractives, les autres répulsives, à l'égard des molécules du second système : les premières donneront une résultante of (*fig.* 652), passant par leur centre d'action N et par le centre d'action o de l'autre système; de même les particules répulsives donneront une résultante oe, passant par le centre d'action P et par le même point o. La résultante générale sera donc la diagonale og ; et comme elle passe à peu près par le centre d'inertie du second système, elle ne tendra encore à lui imprimer qu'un mouvement de translation. Cette résultante est d'ailleurs dans le plan mené par les trois centres d'action o, N, P; et quand les molécules attractives sont en même nombre que les répulsives, et agissent avec la

Digitized by Google

même intensité, sa direction est en outre perpendiculaire à la droite *oO*, qui divise l'angle *PoN* en deux parties égales.

Considérons enfin le cas où les deux systèmes seraient composés l'un et l'autre de molécules d'espèces différentes. Soient *N* et *P* (*fig.* 653) les centres d'action respectifs des molécules attractives et répulsives du premier ; soient *n* et *p* les centres correspondants du second, de sorte qu'il y ait attraction entre *N* et *p*, ainsi qu'entre *n* et *P*, et qu'il y ait répulsion entre *N* et *n*, de même qu'entre *P* et *p* : les actions combinées de *N* et *P* sur *p* donneront une résultante dirigée suivant la diagonale *pe ;* semblablement, les actions de *N* et *P* sur *n* donneront une résultante *nf*. Pour avoir la résultante fiale, on prolongera ces deux lignes jusqu'à leur rencontre en *o*, et prenant *om* = *pe* et *ok* = *nf* : la diagonale *ol* sera la résultante cherchée, qui donnera l'action exercée par le système *PN* sur *pn*. Mais, comme le point *o* peut ne pas faire partie du système *pn*, il faudra concevoir qu'il soit lié à ce système d'une manière invariable sans l'être au système *PN ;* et la force *ol* tendra généralement, en vertu de cette liaison, à donner au système *B* un mouvement de translation et un mouvement de rotation autour de son centre d'inertie.

Examinons maintenant la réaction exercée par le second système sur le premier. D'après l'axiome fondamental de la Mécanique, que l'action et la réaction de deux particules l'une sur l'autre sont égales et directement opposées, il faudra pour l'obtenir composer successivement des forces égales et directement opposées à celles que les particules du premier système exercent sur les particules du second, et il est évident que la réaction totale ainsi trouvée sera toujours égale et directement opposée à l'action totale.

Dans le premier cas, la réaction sera donc représentée par la ligne *Cf* (*fig.* 651), égale et opposée à la résultante *C f*, et que l'on pourra supposer appliquée au centre d'action du premier système qui se trouve sur sa direction : d'où il suit qu'en négligeant toujours la petite différence de situation du centre d'action et du centre d'inertie, on n'aura encore ici qu'un mouvement de translation.

Dans le second cas, la réaction sera de même représentée par *ov* (*fig.* 652), égale et opposée à *og*. Mais comme le point *o* n'appartient pas au premier système et que généralement celui-ci ne sera pas traversé par la direction *ov*, il faudra concevoir que ce point *o* soit lié invariablement au premier système sans l'être au second, et par cette liaison la force *ov* tendra généralement à opérer sur le système *PN* un double mouvement de translation et de rotation. Au reste, cette force *ov* est dans le plan *PoN*, et lorsque les molécules attractives sont en même nombre que les répulsives et agissent avec la même intensité, sa direction est comme celle de *og* perpendiculaire à *oO*.

Enfin, dans le troisième cas, la réaction sera représentée par la ligne *ox* (*fig.* 653), égale et opposée à la résultante *ol*, et appliquée comme elle au point *o*. Pour avoir l'action de *PN* sur *pn*, nous avons conçu tout à l'heure que ce point *o* était lié à ce second système *pn* sans l'être au premier *PN*. Pour avoir maintenant la réaction exercée sur celui-ci, nous concevrons la force *ox* appliquée en un point situé en *o*, et lié au premier système *PN* sans l'être au second. Cette force tendra encore généralement à opérer sur *PN* un double mouvement de translation et de rotation.

Si l'on compare ces résultats avec les indications de la théorie, relativement aux directions des forces qui s'exercent dans les trois genres d'actions que nous avons distingués plus haut, on verra aisément que les trois cas que nous venons d'examiner leur correspondent exactement. Lorsque deux éléments de conducteurs voltaïques agissent l'un sur l'autre, l'action et la réaction sont, comme dans le premier cas, dirigés suivant la droite qui joint les deux éléments ; quand il s'agit de la force qui existe entre un élément de fil conducteur et un élément de solénoïde, les deux parties *M* et

Digitized by Google

N (*fig.* 653 *A*) agissant presque en sens contraire avec des intensités égales, l'action et la réaction sont, comme dans le second cas, dirigées perpendiculairement à la droite qui joint l'élément du courant à l'élément du solénoïde; et enfin deux éléments de solénoïde exercent l'un sur l'autre une action plus compliquée que présente le troisième cas, et dont on ne peut de même rendre raison qu'en la considérant comme le résultat de quatre forces, dont deux attractives et deux répulsives.

Action de la terre sur les courants.

1071. La terre agit sur les courants mobiles soumis à son influence comme un courant fixe dirigé de l'est à l'ouest perpendiculaire au méridien magnétique et principalement accumulé vers l'équateur : par conséquent ce courant peut être considéré comme rectiligne, indéfini et placé à une distance infinie des conducteurs mobiles. Alors, pour constater le fait que nous venons d'énoncer, il suffit d'en vérifier les différentes conséquences.

1072. *Action de la terre sur un courant horizontal mobile autour d'un axe horizontal.* On trouve par le calcul que l'action d'un courant qui parcourt un cercle ou une ligne droite indéfinie sur une portion de courant infiniment petite est toujours perpendiculaire à cette dernière : il suit de là qu'un courant quelconque rectiligne, soumis à l'action de la terre, sera constamment sollicité par des forces parallèles entre elles dans toute l'étendue du conducteur, à cause de la grande distance à laquelle se trouve placé le courant du globe. Ainsi, un courant horizontal librement suspendu ne doit prendre aucun mouvement perpendiculairement à sa longueur, mais se transporter parallèlement à lui-même, suivant le sens du courant. M. Faraday a vérifié ce fait en suspendant à un fil de soie très-long un fil métallique horizontal, dont les extrémités recourbées plongeaient chacune dans un vase plein de mercure; dans tous les azimuths le fil métallique s'avance comme s'il était tiré par des forces égales parallèles, et perpendiculaires à la direction du fil. D'après ce qui précède, le courant mobile doit être repoussé au nord s'il va de l'ouest à l'est, et attiré vers le sud s'il va de l'est à l'ouest : c'est ce qui existe en effet.

1073. *Action de la terre sur un courant vertical mobile autour d'un axe vertical.* D'après ce que nous avons dit (1055), le courant vertical doit se porter à l'est s'il est descendant, et à l'ouest s'il est ascendant. Ce fait peut se vérifier au moyen du conducteur et de l'appareil *fig.* 592 : le plan du conducteur se dirige parallèlement au méridien magnétique, et, si on emploie le conducteur *fig.* 654, l'appareil reste en équilibre dans toutes les positions possibles.

1074. *Action de la terre sur un courant horizontal mobile autour d'un axe vertical.* Si le courant est mobile autour d'une de ses extrémités, il doit tourner d'une manière continue et avec un mouvement uniforme (1054). On vérifie ce fait au moyen du conducteur mobile *fig.* 606, que l'on place sur l'appareil *fig.* 605 : l'effet sur les courants verticaux est nul, et la rotation a lieu de l'est à l'ouest en passant par le sud quand le courant a lieu de la circonférence au centre, et de l'ouest à l'est en passant par le sud quand le courant a lieu du centre à la circonférence.

La propriété de prendre tantôt un mouvement de rotation continu, tantôt une position fixe d'équilibre, par l'influence de la terre, n'appartient pas uniquement aux courants horizontaux ou verticaux. En effet, un petit courant rectiligne, situé d'une manière quelconque dans l'espace et soumis à l'influence de la terre, étant sollicité par une force perpendiculaire à sa direction, si ce petit courant est mobile autour d'un axe, il pourra arriver de deux choses l'une : ou, dans une certaine position, la direction de la force rencontrera l'axe, ou elle ne le rencontrera pas; dans le premier

Digitized by Google

cas il y aura une position fixe d'équilibre, dans le second cas la rotation sera continue. Le premier cas est réalisé par un courant horizontal mobile autour d'un axe horizontal, ou par un courant vertical tournant autour d'un axe vertical; le second par un conducteur horizontal tournant autour d'un axe vertical.

On peut produire la rotation continue d'un courant par l'action de la terre, sans pile, au moyen de l'appareil *fig.* 656. *abcd* est un vase annulaire en zinc, la tige *xy* est en zinc, la capsule *s* ainsi que le conducteur mobile sont en cuivre; le vase étant plein d'eau acidulée, l'électricité positive développée au-dessous de la capsule par le contact des deux métaux descend par la tige de zinc, traverse l'eau acidulée et s'élève dans les conducteurs verticaux: alors le courant a la direction indiquée par les flèches, et le conducteur mobile tourne de l'est à l'ouest en passant par le midi.

1075. *Action de la terre sur un courant qui suit une courbe fermée suspendue de manière à tourner autour d'un axe vertical.* Le plan de la courbe doit se diriger perpendiculairement au méridien magnétique (1058). On constate ce fait au moyen du conducteur mobile *fig.* 657; on le suspend dans les coupes de l'appareil *fig.* 656; aussitôt que le courant électrique passe, le conducteur se place perpendiculairement au méridien magnétique, de manière que le courant ascendant soit à l'ouest. Comme dans cet appareil le support empêche que le conducteur ne puisse faire une révolution complète dans tous les sens, on peut employer le conducteur *fig.* 658; il porte inférieurement un anneau à travers lequel passe la tige sur laquelle est suspendue la coupe *x*, et l'autre extrémité du conducteur porte un coupe pleine de mercure dans laquelle plonge un fil communiquant avec l'autre extrémité de la pile.

M. de la Rive a construit des appareils très-simples et qui se dirigent très-bien par l'influence de la terre: ces appareils consistent (*fig.* 659) en un morceau de liége traversé par deux plaques de cuivre et de zinc, réunies par un fil de cuivre; on fait flotter cet appareil sur de l'eau acidulée, et l'électricité dégagée par le contact des deux métaux produit un courant d'une intensité suffisante pour diriger l'appareil.

1076. La direction que prend, par l'action de la terre, une courbe fermée, mobile autour d'un axe vertical, est une conséquence nécessaire de l'action de la terre sur un courant horizontal et sur un courant vertical. En effet, considérons d'abord le rectangle *fig.* 659 *A*: les deux courants horizontaux étant en sens contraire et égaux, les actions directrices de la terre se font équilibre; il ne reste alors que l'action de la terre sur les deux fils verticaux *bc*, *de*: si le courant suit la direction indiquée par les flèches, le conducteur *bc* tend à se porter à l'est, et le conducteur *de* à l'ouest; si la direction du courant était changée, ce serait le contraire. Dans les deux cas, les forces qui sollicitent les deux branches verticales concourent à donner au système la direction dans laquelle le courant inférieur va de l'est à l'ouest. Si on emploie un courant recourbé d'une manière quelconque, on peut décomposer chacun de ses éléments en deux parties, l'une horizontale et l'autre verticale. Or pour toute courbe fermée, la somme des éléments horizontaux parcourus dans un sens sera égale à la somme des éléments horizontaux parcourus en sens contraire: il y aura par conséquent équilibre dans cette partie du système; mais les courants verticaux tendront tous à prendre une position d'équilibre fixe qui sera évidemment la même, que l'axe de rotation coupe la courbe ou la laisse entièrement d'un côté.

Pour vérifier ces diverses conséquences, on peut employer le conducteur *fig.* 660, dans lequel l'action de la terre est augmentée par les révolutions du fil; on le suspend dans les coupes *xy* (*fig.* 656).

1077. Lorsque l'on soumet à l'action de la terre un conducteur plan mobile autour d'un axe horizontal perpendiculaire au plan du méridien magnétique et qui passe par

Digitized by Google

le centre de gravité du conducteur, le plan du conducteur mobile se dirige perpendiculairement à l'axe magnétique de la terre.

1078. On peut encore vérifier l'influence terrestre en se servant du cylindre électro-dynamique *fig.* 649. Ce cylindre se dirige constamment de manière que les courants qui en parcourent les spires soient ascendants à l'ouest et descendants à l'est. Si le cylindre électro-dynamique était mobile autour d'un axe horizontal passant par son centre de gravité et perpendiculaire au méridien magnétique, l'axe du cylindre se dirigerait parallèlement à l'aiguille d'inclinaison.

Action réciproque des courants et des aimants.

1079. *Action d'un courant sur une aiguille horizontale.* (*Découverte de M. OErsted.*) Soit *AB* (*fig.* 661) une aiguille de déclinaison en équilibre dans le méridien magnétique : si on place au-dessus un fil conducteur parallèle au méridien magnétique, dans lequel le courant est dirigé du sud au nord, on observe que l'aiguille est déviée de sa direction, et que le pôle austral est porté vers l'ouest, et qu'il est dévié vers l'est (*fig.* 662), si le fil est placé au-dessous de l'aiguille. Si on place le conducteur à droite ou à gauche, dans le même plan horizontal que l'aiguille, cette dernière n'éprouve aucune déviation horizontale, mais elle s'incline à l'horizon : lorsque le fil est à l'est, le pôle nord est élevé, et il est abaissé quand le fil est à l'ouest. Dans chaque cas, la déviation serait opposée si le courant dans le fil conducteur était dirigé du nord au sud.

1080. Ampère, en analysant la découverte de M. OErsted, la réduisit à ces deux faits principaux : 1° Le courant électrique tend toujours à amener l'aiguille dans une direction perpendiculaire à la sienne; et, si elle reste ordinairement plus ou moins inclinée, c'est par l'influence du magnétisme terrestre : aussi, en équilibrant la force directrice du globe par un aimant convenablement placé, ou en disposant l'aiguille dans un plan perpendiculaire à l'axe magnétique du globe, ou enfin en rendant l'aiguille astatique par un moyen quelconque, elle se dirige toujours perpendiculairement au fil conducteur; une aiguille d'inclinaison bien centrée et astatique se place de même perpendiculairement à la direction du courant. 2° En supposant un observateur placé dans le fil conducteur, de manière que le courant arrive par les pieds et sorte par la tête, et qu'il ait la face dirigée vers le milieu de l'aiguille, dans toutes les positions possibles, la déviation qu'éprouve l'aiguille est telle, que le pôle austral est toujours porté à gauche de l'observateur. D'après cette règle, on peut facilement prévoir tous les phénomènes de déviation.

Réciproquement, si un barreau aimanté horizontal est fixe, et qu'on en approche un conducteur horizontal mobile autour d'une ligne verticale, le courant se mettra à un angle droit sur l'aimant, de manière que le pôle austral soit à gauche du courant. Ce fait peut facilement se vérifier en suspendant le conducteur *fig.* 640 dans les coupes *xy* de l'appareil *fig.* 636, et plaçant horizontalement au-dessous un barreau aimanté dans une position quelconque.

1081. Nous avons déjà dit qu'Ampère considérait l'action de la terre sur les courants comme provenant de courants électriques dirigés de l'est à l'ouest dans le sens du mouvement apparent du soleil, et nous avons vu que cette hypothèse satisfait à tous les phénomènes que la terre produit sur les conducteurs mobiles. Pour expliquer ceux que les courants exercent sur les aimants, Ampère considère ces derniers comme formés de courants qui parcourent des circuits fermés situés dans des plans perpendiculaires à leur axe magnétique; nous allons faire voir que cette hypothèse satisfait ainsi à toutes les observations que nous venons de rapporter.

Digitized by Google

En effet, si une aiguille aimantée, formée de courants perpendiculaires à son axe, est abandonnée à elle-même, elle se dirigera nécessairement de manière que les plans de ses courants et ceux du globe soient parallèles, et que les courants les plus voisins, c'est-à-dire ceux de la surface du globe où est placée l'aiguille, et ceux de la partie inférieure de l'aiguille, soient dirigés dans le même sens. Ainsi, sur la surface inférieure de l'aiguille, les courants iront de l'est à l'ouest; sur la surface supérieure, de l'ouest à l'est; ils seront ascendants sur la face ouest, et descendants sur la face est. La fig. 663 représente la disposition des courants dans la terre et dans l'aiguille. Alors, si l'on place parallèlement à l'axe et au-dessus de l'aiguille un conducteur dont le courant soit dirigé du sud au nord, les courants de la partie supérieure de l'aiguille, étant dirigés de l'ouest à l'est, tendront à se disposer parallèlement à ceux du courant, et le pôle nord de l'aiguille déclinera vers l'ouest. Si on met le conducteur au-dessous de l'aiguille, les courants en regard du conducteur étant dirigés de l'est à l'ouest, il est évident que le pôle nord de l'aiguille devra être dévié vers l'est; si on place l'aiguille dans le même plan horizontal, et à l'est du conducteur, les courants de la face ouest étant ascendants, le pôle nord de l'aiguille sera abaissé, et, le fil étant placé du côté opposé, le même pôle sera élevé.

1082. Tous les autres phénomènes que présentent les actions des aimants et des conducteurs s'expliquent, dans cette hypothèse, avec la même facilité; mais, avant d'exposer ces phénomènes, nous commencerons par examiner, dans l'hypothèse d'Ampère, la position du point d'application de la résultante de l'action d'un courant sur le pôle d'une aiguille, dans les différents cas qui peuvent se présenter; et, pour cela, nous partirons de la loi de l'action d'un élément de courant sur l'extrémité d'un solénoïde, que nous supposerons être la même que celle d'un pôle magnétique sur un élément de courant. Cette action, comme nous l'avons déjà dit, est perpendiculaire au plan qui passe par l'extrémité du solénoïde et l'élément de courant; elle est proportionnelle au sinus de l'angle formé par la direction de la ligne qui joint le pôle et l'élément avec celle du courant, et en raison inverse du carré de la distance.

1083. *Action d'un conducteur rectiligne indéfini sur le pôle d'un aimant.* Considérons d'abord un courant rectiligne indéfini MN (*fig.* 664), agissant sur le pôle A d'un aimant : il est évident que, toutes les actions élémentaires étant parallèles et appliquées aux différents points de MN, la résultante totale passera par MN, et il résulte du calcul que cette force est en raison inverse de la plus courte distance du point A au courant.

En effet, soit mn un des éléments du courant; en désignant par C l'intensité du courant et par F celle du pôle de l'aimant ou du solénoïde, l'intensité de l'action exercée par le pôle A sur l'élément mn sera

$$\frac{CFds \sin \theta}{r^2} \text{ ou } \frac{CFds \cos \theta}{r^2}.$$

Si nous désignons par a la distance AC de l'aiguille au courant, on aura

$$ads = r^2 d\theta, \quad \text{d'où} \quad ds = \frac{r^2 d\theta}{a} :$$

alors l'action du pôle sur l'élément du courant devient

$$\frac{CFr^2 \cos \theta d\theta}{ar^2} = \frac{CF \cos \theta d\theta}{a};$$

Digitized by Google

et, en intégrant cette expression depuis $\theta = \frac{\pi}{2}$ jusqu'à $\theta = -\frac{\pi}{2}$, on trouve $\frac{2CF}{a}$ pour l'action totale du courant sur le pôle de l'aimant.

Si le courant n'était pas indéfini, en désignant par θ' et $-\theta''$ les valeurs de θ pour les éléments extrêmes, on aurait pour la valeur de la résultante totale

$$CF.\frac{\sin\theta' + \sin\theta''}{a}.$$

1084. *Action d'un circuit fermé sur un des pôles d'un aimant.* La résultante finale passe toujours par le pôle de l'aimant. En effet, supposons d'abord que le circuit soit circulaire, et que le pôle de l'aimant soit dans le plan du cercle.

Soient A (*fig.* 665) le pôle de l'aimant, $mm't$ le circuit que l'électricité parcourt dans le sens indiqué par les flèches; par le point A menons deux tangentes Am et Am', et deux droites infiniment rapprochées As et At : elles intercepteront sur la circonférence deux arcs qr et st, que l'électricité parcourt dans des sens contraires. Les actions exercées par chacun de ces deux éléments se réduisent, comme nous l'avons vu, à une force perpendiculaire au plan du cercle et passant par le milieu des deux éléments; ces forces sont dirigées en sens contraires et ont des intensités représentées par $qr \sin Aqr : Aq^2$ et $st \sin Ats : As^2$; mais, comme les angles Aqr et Ats ont pour mesure, le premier $1/2\,(qs + qr)$, et le second $1/2\,(qs + st)$, qui ne diffèrent que d'une quantité infiniment petite, il s'ensuit que les angles Aqr et Ast sont égaux; par suite, que les triangles Aqr et Ast sont semblables, et enfin que les arcs rq et st sont proportionnels à leur distance au point A. Alors les intensités des forces sont en raison inverse de leurs distances au point A, et par conséquent leur résultante passe par ce point. Comme il en sera de même de tous les systèmes de droites très-voisines tracées entre les tangentes Am et Am', il en résulte évidemment que les deux parties du circuit mrm' et mtm' produisent deux systèmes de forces parallèles opposées dont la résultante unique passe par le point A. Ce principe n'est pas borné au cas particulier que nous venons de considérer; il est général et s'applique à un circuit fermé d'une forme quelconque.

1085. En effet, considérons d'abord un élément mm' (*fig.* 666) et un pôle A d'un aimant; supposons que l'aimant puisse tourner autour d'une droite quelconque passant par le pôle, et cherchons le moment de rotation de l'élément mm' autour de cet axe. L'intensité de la force appliquée à l'élément sera $CF \sin\phi ds : r^2$ (1). Désignons par du le double de l'aire du triangle mAm' : on aura $du = r \sin\phi\, ds$. Alors l'expression (1) devient $CF\,du : r^3$. La force appliquée à l'élément de courant étant perpendiculaire au plan du triangle mAm', il faut, pour obtenir le moment de rotation, prendre la composante de cette force perpendiculairement au plan OAB, et multiplier cette composante par la distance du point O à l'axe de rotation. Or, en désignant par E l'angle des plans mAm' et OBA, la composante sera $CF\,du \cos E : r^3$; et, comme $du \cos E$ représente la projection de l'aire du sur le plan OAB, en désignant par θ l'angle que OA fait avec AB, cette aire pourra être représentée par $r^2 d\theta$; mais la perpendiculaire abaissée de O sur AB ayant pour longueur $r \sin\theta$, le moment de rotation sera $CF \sin\theta d\theta$. Si nous supposons maintenant que le courant soit LL' (*fig.* 667), il faudra intégrer l'expression $CF \sin\theta d\theta$, depuis θ' jusqu'à θ'', et la valeur de cette intégrale sera $CF(\cos\theta'' - \cos\theta')$. Si le circuit est fermé, $\theta' = \theta''$, et l'expression précédente devient nulle : ainsi, dans ce cas, le moment de rotation est nul; or, comme l'action n'est pas nulle, en général, il faut nécessairement que la force passe par le pôle de l'aimant

Ainsi l'action d'un circuit fermé sur le pôle d'un aimant passe toujours par ce

Digitized by Google

pôle; or, comme les corps conducteurs qui réunissent les pôles d'une pile et la pile elle-même forment toujours un circuit fermé dans lequel le courant traverse la pile comme les conducteurs, il s'ensuit que l'action d'un courant sur le pôle d'un aimant se réduit à une force unique qui passe toujours par le pôle de l'aimant. Il n'y a à ce principe qu'une seule exception : si l'aimant faisait lui-même partie du circuit, ou si le courant passait par un corps invariablement fixé à l'aimant, cette partie du circuit ne pourrait imprimer aucun mouvement au pôle de l'aimant, parce qu'il y aurait une réaction égale et opposée du pôle sur les éléments de ce courant qui tendrait à lui donner un mouvement contraire. C'est ce dont on se rend plus facilement compte encore en considérant l'aimant comme un solénoïde : alors, tous les éléments du courant et des petits circuits circulaires agissant suivant les droites qui les joignent, les actions et les réactions tendent à rapprocher ou à éloigner ces éléments ; et, les actions et les réactions étant égales et opposées, la liaison de ces points détruit complétement les effets qui seraient produits si chacun d'eux était indépendant. Dans ce cas, la force qui agit pour faire mouvoir l'aimant résulte du courant qui se termine aux points où il pénètre et sort de l'aimant ou du corps invariablement lié avec lui : cette force est alors appliquée en un point qui dépend de la forme du circuit.

Quant à la force qui ferait mouvoir le circuit s'il était libre, cette force devant être égale et opposée à celle qui ferait mouvoir l'aimant et appliquée au même point, puisque, si l'aimant et le courant étaient solidaires, les actions réciproques de l'aimant et du courant ne pourraient produire aucun mouvement dans le système, il s'ensuit que cette force passe toujours par le pôle de l'aimant. Mais pour qu'il en soit ainsi, il faut nécessairement que les différentes parties du circuit soient solidaires, car c'est la résultante totale qui passe par ce point. Si le circuit, et c'est ce qui arrive toujours, était composé de deux parties, l'une fixe et l'autre mobile, cette dernière se mouvrait en vertu de l'action du pôle de l'aimant sur les éléments qui la composent, et cette résultante passerait par un point qui varierait avec la forme et l'étendue de cette partie mobile du circuit.

1086. Il résulte de ce qui précède que, quand le pôle d'un aimant est soumis à l'action d'un courant rectiligne très-long MN (*fig.* 668), ce courant faisant toujours partie d'un circuit fermé, la force est réellement appliquée au pôle de l'aiguille, et non pas au courant lui-même, comme cela arriverait si on pouvait produire un courant rectiligne isolé, et elle varie suivant une loi différente. Mais si le circuit fermé est composé d'une partie rectiligne très-voisine de l'aiguille et d'une partie d'une forme quelconque très-étendue, comme dans la figure 668, alors la résultante totale passera par le pôle de l'aimant; mais cette force variera sensiblement suivant la même loi que la résultante partielle du courant rectiligne, c'est-à-dire en raison inverse de la plus courte distance du pôle au courant. En effet, supposons d'abord que tout le circuit soit dans un même plan passant par le point A. L'action du pôle A sur MN est appliquée au point m, celle de A sur le reste MPN du circuit est appliquée au point n, et ces forces sont nécessairement parallèles et opposées, et situées dans un même plan passant par le point A, puisque leur résultante passe par ce point. Alors, en désignant la première force par R, la seconde par S, la distance Am par a, la distance An par b, on aura $Ra=Sb$; mais à mesure que la partie MPN du circuit s'allongera, que le point P s'éloignera, b augmentera, et alors S diminuera, et comme la force appliquée au point A est $R-S$, quand S sera très-petit par rapport à R, on pourra supposer que $R-S$ suit la même loi que la force R, c'est-à-dire qu'elle est en raison inverse de a.

Si la seconde partie du circuit n'était pas dans le plan AMN, la résultante de cette partie du circuit serait encore dans le plan mené par le point A et la résultante de la

Digitized by Google

partie *MN*, puisque la résultante finale doit passer par le point *A*, car deux forces n'ont une résultante qu'autant qu'elles sont dans un même plan : alors, en désignant par *tu* (*fig.* 669) la résultante de la deuxième partie du circuit, par *rs* celle de la première, *An* sera la direction de la résultante finale, et, en abaissant sur *tu* la perpendiculaire *Ap*, les forces seront en raison inverse de *Ar* et *Ap*, et on voit facilement qu'à mesure que la résultante *tu* s'éloignera, la résultante finale s'approchera toujours davantage d'être parallèle et égale à *rs*. Ainsi, quand la seconde partie du circuit sera très-éloignée, que l'aiguille sera très-voisine du courant rectiligne, on pourra toujours considérer la résultante finale comme sensiblement égale à la résultante de la partie rectiligne du courant voisine de l'aiguille ; mais cette force sera appliquée au pôle de l'aimant, et non pas au courant rectiligne lui-même, comme cela aurait lieu si cette partie rectiligne agissait seule. En d'autres termes, quand un circuit est composé de deux parties, l'une rectiligne, l'autre d'une forme quelconque, cette dernière partie modifie la résultante de la partie rectiligne de trois manières, en changeant son point d'application, sa valeur et sa direction : la première modification est toujours la même, quelle que soit la forme du circuit ; elle consiste toujours à transporter le point d'application du courant au pôle ; et les deux autres peuvent au contraire être atténuées autant qu'on voudra. Cela bien entendu, nous allons rapporter les expériences faites par MM. Biot et Savart pour déterminer la loi des actions des courants sur les aiguilles aimantées.

1087. *Expériences de MM. Biot et Savart.* Une aiguille aimantée *ab* (*fig.* 670) suspendue à une fil de cocon, et rendue astatique par un aimant convenablement placé, fut mise en regard d'un courant rectiligne très-long *MN*, faisant partie d'un circuit fermé très-étendu. L'aiguille se dirigea perpendiculairement au courant, le pôle austral à gauche, et y resta en équilibre stable. Il résulte de ce fait plusieurs conséquences importantes. D'abord, en quelque lieu que les forces qui sollicitent l'aiguille soient appliquées, on peut toujours concevoir ces forces décomposées en deux, l'une passant par le centre de rotation et l'autre par le pôle de l'aimant. La première étant sans influence, on pourra considérer les mouvement de l'aiguille comme résultant des forces appliquées à ses pôles. Mais, l'aiguille *ab* (*fig.* 671) restant en équilibre dans une position perpendiculaire à la plus courte distance *oc* de son centre au courant, et les pôles étant égaux et à la même distance du centre de rotation, il en résulte que les forces qui sollicitent les pôles sont égales et symétriquement placées par rapport à la ligne *oc* : ainsi l'angle *m* est égal à l'angle *m'*. De plus, comme l'équilibre est stable, les forces sont dirigées suivant *ae* et *bf*. En effet, si on incline *ab* d'une quantité très-petite, la distance *oc* étant très-grande relativement à l'aiguille, les intensités et les directions des forces ne changeront pas sensiblement. Supposons que ce soit le point *a* qui se rapproche de *c*, la direction de la force *ae* se rapprochera de celle de *ab*, et par conséquent la composante de la force perpendiculaire à l'aiguille diminuera, et ce sera évidemment le contraire de l'autre côté : par conséquent l'excès de force développée en *b* ramènera l'aiguille à sa position primitive, et il est facile de voir que, si les forces étaient dirigées en sens contraire, l'équilibre serait instable. Il résulte aussi de la position de l'aiguille que les directions des forces sont perpendiculaires aux lignes *ac* et *bc*. En effet, si on suppose que le pôle *b* coïncide avec le pôle *a*, l'action au point *a* devra être nulle : ainsi les forces résultant des deux pôles devront être égales et opposées. Mais il n'y a aucune raison pour que la ligne *ae* soit plus inclinée du côté de la force qui résulte de l'action du pôle boréal que de celle qui résulte de l'action du pôle austral : ainsi la ligne *ac* sera perpendiculaire à la direction commune des forces.

L'aiguille, étant très-peu dérangée de sa position d'équilibre, faisait autour de

Digitized by Google

cette position d'équilibre des oscillations isochrones, comme un pendule dérangé de sa position d'équilibre : il en résultait alors qu'à chaque instant la force qui sollicitait l'aiguille était sensiblement proportionnelle à l'angle d'écart, et, par suite, qu'on pouvait appliquer à ces oscillations la formule du pendule. On peut d'ailleurs facilement se rendre compte de ce résultat, en observant que, dans les circonstances de l'expérience, l'intensité des forces et leurs directions ne changeaient pas sensiblement, et que les forces développées provenaient uniquement des variations d'inclinaison de ces forces sur les normales aux pôles de l'aiguille : en effet, on voit facilement, à l'inspection de la fig. 672, qu'en désignant par φ l'angle des forces avec les normales à l'aiguille dans la position de repos, et par δ la déviation de l'aiguille, les angles des forces et des normales deviennent $\varphi + \delta$ et $\varphi - \delta$, et les composantes normales sont $F \cos(\varphi + \delta)$ et $F \cos(\varphi - \delta)$; et, comme le mouvement a lieu en vertu de la seconde composante diminuée de la première, il s'ensuit que la force agissant pour ramener l'aiguille à sa position primitive est représentée par $2F \sin \varphi \sin \delta$. Elle est alors, comme dans le pendule, proportionnelle à l'angle d'écart.

Ainsi on pouvait mesurer l'intensité de la force qui faisait osciller l'aiguille dans chaque position du courant au moyen de la formule du pendule, et ces intensités sont en raison inverse des carrés des temps d'un même nombre d'oscillations.

En faisant ainsi osciller l'aiguille à différentes distances du conducteur, et en prenant les précautions indiquées (906) pour détruire l'erreur résultant de la variation d'intensité de la pile, MM. Biot et Savart ont trouvé que les forces étaient en raison inverse des distances. Ces forces, qui font mouvoir l'aiguille, sont représentées par $F \sin \varphi$; mais, comme l'aiguille était très-petite relativement à sa distance au conducteur, φ était sensiblement constant, et la loi était applicable à la force elle-même.

Ainsi la loi des oscillations conduit à la même conséquence que l'hypothèse d'Ampère, en supposant la force appliquée aux pôles de l'aiguille. Mais il faut bien remarquer que la loi trouvée par MM. Biot et Savart n'aurait plus lieu si les forces étaient appliquées sur le conducteur, car alors il faudrait transporter les forces aux pôles de l'aiguille; elles seraient alors augmentées à peu près proportionnellement aux distances de ces pôles au conducteur; et, comme ces forces sont en raison inverse des mêmes distances, les forces produisant l'oscillation, et par conséquent les temps des oscillations, ne varieraient pas avec la distance. Mais cette supposition d'un courant indéfini ne peut pas se réaliser : toujours, quand c'est l'aiguille qui est mobile, le circuit est fermé, la résultante passe par le pôle de l'aiguille, et la force totale suit sensiblement les lois des actions du courant rectiligne.

De la loi relative à la résultante totale Laplace a déduit l'action de chaque élément de courant sur un pôle de l'aiguille, et il a trouvé que cette action, appliquée au pôle, était perpendiculaire au plan passant par le pôle et l'élément, et en raison inverse du carré de la distance. Mais cette loi pouvait être modifiée par un coefficient dépendant de l'inclinaison de chaque élément sur sa distance au pôle : il restait alors à faire de nouvelles expériences pour savoir si ce coefficient existait réellement, et quelle était sa composition.

Pour cela, MM. Biot et Savart ont disposé le fil conducteur comme l'indique la fig. 673. Les deux parties XY et YZ étaient également inclinées à l'horizon; la distance du point Y à l'aiguille était constante, et on faisait seulement varier l'angle α. L'expérience fit connaître que l'action totale variait proportionnellement à la tangente de la moitié de l'angle α. De ce résultat de l'observation Laplace déduisit que l'intensité de l'action d'un élément de courant variait proportionnellement au sinus de l'angle que fait avec la direction du courant la ligne qui joint le pôle de l'aimant avec l'élément du courant.

Digitized by Google

Ce dernier résultat peut facilement se déduire de la loi élémentaire : en effet, dans le cas où le courant est plié (fig. 673), l'action du pôle A sur l'élément D est $\frac{k \sin \phi \, ds}{r^2}$, et on a $r = a \frac{\sin \alpha}{\sin \phi}$; mais $DE = r \cos \phi = \frac{a \sin \alpha}{\sin \phi} \cos \phi = a \sin \alpha \cos \phi$; et, en différentiant cette équation, il vient $ds = -a \frac{\sin \alpha d\phi}{\sin^2 \phi}$: alors l'action de l'élément ds sur le pôle A est

$$-k \sin \phi \frac{\sin^2 \phi}{a^2 \sin^2 \alpha} \cdot \frac{a \sin \alpha}{\sin^2 \phi} d\phi = -k \frac{\sin \phi d\phi}{a \sin \alpha},$$

et l'action du conducteur XYZ sur le pôle A est égale à

$$-\frac{2k}{a \sin \alpha} \int_0^\alpha \sin \phi d\phi = \frac{2k}{a \sin \alpha} (1 - \cos \alpha) = \frac{2k}{a} \cdot \frac{2 \sin^2 \frac{1}{2} \alpha}{2 \sin \frac{1}{2} \alpha \cos \frac{1}{2} \alpha} = \frac{2k}{a} \operatorname{tang} \tfrac{1}{2} \alpha.$$

1088. Ainsi, il est maintenant bien constaté que les lois de l'action d'un pôle magnétique sur un élément de courant sont exactement celles des actions d'un pôle de solénoïde sur un élément de courant, et que la force dirigée perpendiculairement au plan qui passe par le pôle et l'élément est en raison inverse du carré de la distance.

Nous admettrons en outre, d'après la théorie d'Ampère, que les forces élémentaires sont appliquées aux éléments de courants; que la résultante de l'action totale d'un circuit fermé sur le pôle d'un aimant passe par ce pôle; et que, lorsqu'un aimant agit sur un circuit qui est toujours fermé, mais dont une seule partie est mobile, la force qui produit le mouvement de cette partie du circuit est appliquée en un point qui dépend de sa forme, et qui ne passe pas par le pôle de l'aimant.

1089. *Action directrice d'un conducteur rectiligne horizontal sur une aiguille de déclinaison.* Soient AB (*fig.* 674) une aiguille aimantée horizontale mobile autour du point O, MN un courant horizontal : en supposant le courant rectiligne très-long, l'aiguille très-voisine, et le reste du circuit très-éloigné, les forces appliquées aux pôles seront perpendiculaires aux plus courtes distances des pôles au courant; par conséquent elles seront horizontales et perpendiculaires à la direction de l'aiguille, quand l'aiguille et le fil seront parallèles; et, comme les forces appliquées aux pôles agissent en sens contraires, leurs effets s'ajouteront, et l'aiguille tournera. Mais à mesure qu'elle changera de position, la direction de la force appliquée au pôle s'inclinera sur le plan que l'aiguille peut parcourir, puisque cette force est perpendiculaire à la plus courte distance du pôle au courant; et, cette force étant toujours dans le plan vertical mené par le pôle, sa composante horizontale perpendiculaire à la direction de l'aiguille deviendra de plus en plus petite, et l'équilibre s'établira quand cette composante sera égale à la force directrice de la terre, ou quand elle sera nulle, si l'aiguille est astatique; ce qui arrivera évidemment lorsque l'aiguille sera perpendiculaire au courant.

Nous pouvons même calculer l'intensité de l'action exercée par le courant sur l'aiguille, dans la supposition que nous avons admise, c'est-à-dire quand l'aiguille est assez rapprochée du courant rectiligne, et le reste du circuit assez éloigné pour que l'on puisse admettre que la force totale suit sensiblement les lois de l'action du courant rectiligne. Pour cela désignons par l la demi-distance des pôles de l'aiguille, par C l'intensité du courant, par F et f les intensités magnétiques de l'aiguille et de la terre, et par ϕ la déviation de l'aiguille dans l'état d'équilibre : alors la force directrice de la terre sera $Ff \sin \phi$. Pour trouver l'action du courant sur le pôle A (*fig.* 675), abaissons du point A la perpendiculaire AP sur le courant MN, la force sera dirigée perpendiculairement à AP, et dans le plan APQ perpendiculaire au

Digitized by Google

courant, et son intensité sera $F.\ C : AP$; sa composante horizontale sera $F.\ C.\ \sin PAQ : AP$, et la composante perpendiculaire à la direction de l'aiguille sera $F.\ C.\ \sin PAQ.\ \cos\phi : AP$; mais $\sin PAQ = PQ : AP = d : AP$. Ainsi dans l'état d'équilibre l'action du courant est

$$\frac{F.\ C.\ d}{AP^2}\cos\phi = \frac{F.\ C.\ d\cos\phi}{d^2 + l^2\sin^2\phi},$$

et on a $$\frac{F.\ C.\ d\cos\phi}{d^2 + l^2\sin^2\phi} = Ff\sin\phi, \quad \text{d'où} \quad C = f\,\text{tang}\,\phi\left(\frac{d^2 + l^2\sin^2\phi}{d}\right).$$

Ainsi la déviation ϕ est indépendante de l'intensité magnétique de l'aiguille.

1090. *Action attractive et répulsive des aimants et des conducteurs.* Outre l'action directrice exercée par le fil conducteur sur l'aiguille aimantée, Ampère a découvert que ce même fil exerce sur un aimant une autre action, tantôt attractive et tantôt répulsive. Cette action est à son maximum quand la direction du fil forme un angle droit avec l'axe de l'aimant, et de signe contraire pour une même direction du courant, quand le point où cet axe est coupé par la ligne qui mesure la plus courte distance au fil se trouve dans l'intervalle compris entre les pôles, ou hors de cet intervalle. Quand la plus courte distance du fil et de l'aimant rencontre ce dernier entre les pôles, il y a attraction si le pôle austral de l'aimant est à droite du courant, et répulsion dans le cas contraire.

On vérifie ce fait en approchant un conducteur vertical d'une aiguille horizontale qui ne peut se mouvoir que parallèlement à elle-même, ou en suspendant un faible barreau aimanté à un fil de soie, et approchant un conducteur horizontal.

On peut facilement se rendre compte de ces effets. Nous avons vu, en parlant des expériences de MM. Biot et Savart, que, quand une aiguille AB (*fig.* 676) mobile autour de son centre était sollicitée par un courant perpendiculaire au plan qu'elle peut décrire, l'aiguille se plaçait perpendiculairement à la plus courte distance du courant à l'aiguille, et que les forces étaient toutes deux dirigées du même côté de l'aiguille. Supposons que l'aiguille soit fixe, faisons mouvoir le courant parallèlement à lui-même, et examinons les directions que prendront les forces, en nous rappelant qu'elles sont toujours perpendiculaires aux lignes Am et Bm : si nous supposons que le point m s'approche de la ligne Ay perpendiculaire à AB, la direction de la force appliquée au point A se relèvera toujours davantage; elle sera dirigée suivant AB lorsque le point m sera sur Ay, et lorsque le point m aura dépassé cette ligne, la force s'inclinera en sens contraire, tandis que la force appliquée au point B restera toujours dirigée vers la droite de AB; le contraire aurait évidemment lieu si le point m s'approchait de la ligne Bn et la dépassait ensuite. Ainsi, tant que le fil conducteur sera renfermé entre les plans horizontaux qui passent par les lignes Ay et Bn, les composantes horizontales des forces seront dirigées dans le même sens, l'effet sera égal à leur somme, et l'aiguille sera portée vers le conducteur on en sens contraire suivant le sens du courant; mais quand le courant aura dépassé la ligne Ay ou Bn, une des deux composantes changera de signe, et on conçoit qu'au delà, le sens du mouvement pourra être changé.

On peut même déterminer les positions du courant où ces changements de sens du mouvement auront lieu : en effet, d'après ce qui précède, les composantes horizontales des forces sont

$$FC\cos a : Am \quad \text{et} \quad FC\cos b : Bm,$$

et la force qui produit le mouvement est

Digitized by Google

$$FC\ (\cos a : Am + \cos b : Bm).$$

Cos a changera de signe quand le point m dépassera Ay, et l'action, d'abord positive quand le second facteur sera positif, deviendra nulle avec lui, et changera de signe quand il deviendra négatif : ainsi, en égalant à zéro le second facteur, nous pourrons déterminer les lieux pour lesquels l'action du courant sur l'aiguille est nulle. En désignant par x et y les coordonnées du point m, on a

$$\cos a = x : Am, \cos b = (2l - x) : Bm,$$
$$\overline{Am}^2 = x^2 + y^2, \quad \overline{Bm}^2 = y^2 + (2l - x)^2;$$

et, pour l'équation de la courbe cherchée,

$$\frac{x}{x^2 + y^2} + \frac{2l - x}{y^2 + (2l - x)^2} = 0, \quad \text{ou} \quad y^2 - x^2 + 2lx = 0.$$

Cette équation appartient à un hyperbole équilatère rapportée à son sommet : ainsi, quand le fil, en restant parallèle à sa direction primitive, passera par les différents points de cette courbe hyperbolique, son action sur l'aiguille sera nulle.

On pourrait facilement résoudre le problème d'une manière plus générale en supposant l'axe de rotation de l'aiguille placé en un point quelconque de sa direction : en effet, soient (*fig.* 677) AB l'aiguille, m le point de rencontre du conducteur rectiligne avec un plan mené par l'axe de l'aiguille perpendiculairement au conducteur, o la projection de l'axe de rotation $2l$ la longueur AB de l'aiguille, x et y les coordonnées du point m, rapportées aux axes AX et AY, et λ la distance AO Dans le cas de la figure, les forces agissent dans le même sens, et les moments de rotation sont évidemment

$$FC\,.\,Op : Am \quad \text{et} \quad FC\,.\,Oq : Bm,$$

et la somme des moments sera

$$FC\left(\frac{Op}{Am} + \frac{Oq}{Bm}\right) :$$

par conséquent, pour obtenir la courbe d'équilibre, il faudra, comme précédemment, égaler à zéro le second facteur. Or, il est facile de reconnaître, à l'inspection de la figure, qu'on a

$$Op = AO \cos a = \lambda \cos a, \quad Oq = BO \cos b = (\lambda - 2l) \cos b;$$
$$\cos a = x : Am, \quad \cos b = (2l - x) : Bm;$$

et
$$\overline{Am}^2 = x^2 + y^2, \quad \overline{Bm}^2 = y^2 + (2l - x)^2.$$

Ainsi l'équation de la courbe cherchée est

$$\frac{\lambda x}{x^2 + y^2} + \frac{(\lambda - 2l)\ (2l - x)}{(2l - x)^2 + y^2} = 0 \ldots \quad (a)$$

Si le point de suspension était placé à une distance infinie, on aurait $\lambda = \infty$, et l'équation (a) deviendrait

$$y^2 - x^2 + 2lx = 0,$$

équation que nous avons déjà trouvée précédemment.

Si on supposait que le centre de rotation fût au centre de l'aiguille, il faudrait faire $\lambda = l$ dans l'équation (a), qui deviendrait alors

$$(x - l)\ (x^2 + y^2 - 2lx) = 0,$$

Digitized by Google

équation qui peut être satisfaite en posant

$$x - l = 0 \quad \text{ou} \quad x^2 + y^2 - 2lx = 0.$$

La première équation est celle d'une droite perpendiculaire à l'aiguille, et passant par son centre; la seconde est celle d'un cercle décrit sur AB comme diamètre (*fig.* 677 *A*) : ainsi, quand le conducteur rencontrera le plan que l'aiguille peut parcourir en un point de la droite MN ou du cercle ABC, l'aiguille restera immobile.

Enfin, si on suppose que l'aiguille soit mobile autour d'une extrémité, celle placée à l'origine, en faisant $\lambda = 0$ dans l'équation (a), il vient

$$2l - x = 0,$$

équation qui appartient à une droite perpendiculaire à la direction de l'aiguille, et passant par l'extrémité B.

1091. L'action étant toujours égale et opposée à la réaction, il s'ensuit que, si l'aiguille devenait fixe et le conducteur mobile, on obtiendrait des phénomènes semblables à ceux que nous venons de décrire. Ainsi, en plaçant horizontalement un aimant devant le côté vertical qm du conducteur mobile astatique (*fig.* 639), le courant sera attiré ou repoussé suivant le sens du courant et les positions relatives des pôles, du courant et de l'axe de rotation, du moins quand l'équilibre n'existera pas.

1092. On peut facilement déduire de ce qui précède que, quand un conducteur rectiligne mobile autour d'un axe parallèle est soumis à l'action d'un aimant, perpendiculaire à son plan, dont les deux pôles sont placés de chaque côté, le conducteur est amené au milieu de l'aimant lorsque la gauche du courant regarde le pôle austral; et que, dans le cas contraire, le conducteur peut rester en équilibre instable au milieu de l'aimant; mais, pour peu qu'il en soit écarté, il continue de s'en éloigner, parce que, dans le premier cas, les actions des deux pôles sont répulsives, que dans le second elles sont attractives, et que ces actions augmentent à mesure que la distance diminue. Cette expérience peut se faire au moyen du conducteur mobile *fig.* 639.

1093. Un aimant exerce sur un fil conducteur, contourné autour de son axe, et dans un plan perpendiculaire à cet axe, une action attractive ou répulsive qui est encore une conséquence de ce qui précède, et que l'on peut vérifier à l'aide d'un anneau électro-dynamique flottant (*fig.* 659). Examinons d'abord le cas où le plan du conducteur passe par le centre du barreau. En considérant l'aimant comme un solénoïde, il est facile de voir que son action sur le conducteur tend à le faire mouvoir parallèlement à l'axe de l'aimant quand la direction du courant du fil est la même que celle des courants de l'aimant, et qu'elle tend au contraire à le maintenir en équilibre stable au milieu de l'aimant quand le courant du fil se meut dans une direction opposée à ceux de l'aimant.

Si on présente l'aimant au cercle de manière qu'il soit tout entier et toujours hors du cercle, le conducteur s'approche de l'aimant quand les courants sont dans la même direction, et s'en éloigne dans le cas contraire. Ces attractions et ces répulsions deviennent bien plus énergiques en employant le conducteur astatique *fig.* 679.

Si on place un aimant dans un des anneaux du conducteur astatique *fig.* 678, de manière que l'axe de l'aimant passe par le centre, qu'il soit perpendiculaire au plan du conducteur, et que le pôle austral soit à droite du courant, tous les éléments du cercle sont attirés par le barreau, et il y a équilibre; mais si le cercle est un peu incliné sur le barreau, les attractions sur les demi-circonférences tendront à dimi-

Digitized by Google

nuer les angles aigus, et les deux parties de l'anneau viendront s'appliquer contre les parties opposées de l'aimant. Si le pôle austral est à gauche, alors tous les éléments du cercle sont repoussés et l'équilibre est stable : car, si le cercle se trouvait incliné, les forces répulsives émanées du barreau tendraient à augmenter les angles aigus, et par conséquent à rétablir la position à angle droit.

Si le barreau est placé hors du cercle, les courants de l'aimant du côté du conducteur auront des positions différentes, relativement aux deux demi-circonférences, situées de chaque côté de l'axe de révolution. Si la plus voisine du barreau est attirée, la plus éloignée sera repoussée et l'équilibre sera stable. Dans le cas de répulsion de la demi-circonférence voisine, l'équilibre sera instable, et la plus faible inclinaison fera tourner l'appareil d'une demi-circonférence.

Supposons maintenant que le cercle puisse se mouvoir autour d'une ligne verticale qui ne passe pas par son centre (*fig.* 680) ; plaçons un barreau aimanté perpendiculaire au plan mobile et de manière que son milieu soit dans ce plan et au centre du cercle. Si les courants dans le conducteur et dans l'aimant sont dirigés en sens contraires, il y a équilibre stable dans cette position ; dans le cas contraire l'équilibre est instable, car aussitôt que le plan mobile ne passe plus par le milieu de l'aimant, chaque élément tend à se mouvoir dans le sens du plus petit segment du barreau. Quand le barreau est hors du cercle dans le plan horizontal qui passe par son centre, et a son milieu peu éloigné du plan mobile, les deux parties du cercle séparées par un diamètre parallèle à l'axe de rotation éprouvent des actions différentes; et en supposant le barreau plus loin de l'axe de rotation que le centre du cercle, l'effet produit sur la demi-circonférence voisine du barreau l'emportera sur l'autre à cause de la proximité et de la longueur du bras de levier : alors, lorsqu'il y aura répulsion, l'équilibre sera stable; et quand il y aura attraction, le cercle se mouvra dans le sens du plus petit segment.

1094. *Rotation d'un conducteur autour d'un aimant.* Cette expérience se fait au moyen de l'appareil *fig.* 681. MN est un vase métallique annulaire plein d'eau acidulée, dont l'orifice central est occupé par le pôle d'un aimant; sur les bords de cet orifice s'élève une tige en verre *ab*, terminée par un godet dans lequel repose la pointe *sa* d'un conducteur *cdef*, dont les extrémités inférieures sont soudées à un anneau en cuivre qui plonge dans le liquide; au-dessus de la pointe *sa*, le conducteur mobile porte une petite capsule pleine de mercure, dans laquelle plonge un fil qui communique avec une des extrémités de la pile; l'autre communique avec le vase annulaire. Aussitôt que le courant traverse le fil conducteur, il tourne autour de l'aimant d'une manière continue; si le courant est ascendant dans le conducteur et le pôle austral en haut, le mouvement de rotation a lieu de l'est à l'ouest par le midi; si on renverse l'aimant, le mouvement a lieu en sens contraire; si on place l'aimant au-dessus de la coupe *s*, le pôle boréal en-dessus, le mouvement a encore lieu de l'est à l'ouest par le midi.

On explique facilement ce phénomène en considérant l'aimant comme renfermant des courants circulaires parallèles à son axe, car alors les circonstances sont les mêmes que celles de l'expérience dans laquelle un conducteur fini tourne autour d'un courant circulaire; ou, en considérant les actions d'un pôle de l'aimant sur tous les éléments des courants mobiles, les forces qui résultent de ces actions sont évidemment horizontales, parallèles entre elles et à la circonférence du cercle décrit, et tendent toujours à faire tourner le conducteur dans le même sens.

1095. *Rotation d'un conducteur autour de son axe produite par un aimant.* Pour effectuer cette rotation, on emploie l'appareil *fig.* 682 : *FL* est un support en verre ou en bois, à l'extrémité duquel se trouve une tige horizontale en cuivre *LK*,

Digitized by Google

terminée par la boîte *K*, destinée à tenir l'aimant *cc* suspendu; sa partie inférieure se termine par une pointe qui plonge dans le godet *d* d'une tige de cuivre *mn* lestée par un prolongement en platine, et flottant dans du mercure qui remplit le vase *MN*; l'extrémité supérieure *c* de l'aimant communique avec un pôle de la pile et le mercure avec l'autre. On rend le mouvement de rotation plus rapide en remplaçant le conducteur par un tube de cuivre : la masse du conducteur étant alors beaucoup diminuée, celle du contre-poids l'est également. Pour concevoir la cause de ce mouvement, il faut remarquer que le conducteur ne doit point être considéré comme conduisant l'électricité par une droite sans épaisseur, mais comme renfermant autant de courants qu'il contient de fils de molécules parallèles à son axe. Ainsi, cette expérience rentre exactement dans la précédente.

1096. *Rotation du mercure produite par un aimant.* Si on plonge dans un bain de mercure perpendiculairement à sa surface deux fils de cuivre communiquant avec une pile très-énergique, et si on approche le pôle d'un fort aimant, soit au-dessus, soit au-dessous d'un des fils, le mercure tourne autour d'eux comme axes, suivant les circonstances ordinaires des rotations électromagnetiques, et avec une vitesse qui augmente considérablement lorsqu'on fait agir simultanément les pôles opposés de deux aimants, l'un au-dessus, l'autre au-dessous de la surface. Quand le pôle de l'aimant est placé au-dessus de la surface du mercure, entre les deux fils, le mouvement circulaire cesse, et il s'établit dans le liquide deux courants opposés, l'un à droite, l'autre à gauche de l'aimant. Cette expérience peut être faite d'une autre manière qui présente des phénomènes plus singuliers.

On prend deux fils de cuivre (*fig.* 683) dont les extrémités soient planes et polies, et après les avoir recouverts d'une matière isolante dans toute leur longueur, on les fait passer à travers deux ouvertures pratiquées dans le fond d'un vase de verre, de manière que leurs extrémités s'élèvent à la même hauteur; on remplit alors le vase de mercure de manière à couvrir les extrémités des tiges, et on les met par leurs parties inférieures en contact avec les pôles d'une pile. Aussitôt que le circuit est fermé, le mercure s'élève au-dessus des extrémités des tiges, d'où s'échappent des ondes dans toutes les directions. En approchant le pôle d'un fort aimant, le sommet du cône s'abaisse; à une plus petite distance la surface du mercure devient plane, et le mouvement de rotation du métal commence à s'effectuer; à une distance plus petite encore le mercure est déprimé. L'étain en fusion se comporte de la même manière.

Ces mouvements rentrent évidemment dans la classe des mouvements de rotation des courants finis produits par les courants circulaires, et on peut les expliquer de la même manière, on en considérant que l'action exercée par le pôle d'un aimant sur un élément de courant est perpendiculaire au plan qui passe par l'élément de courant et le pôle.

1097. *Rotation d'un aimant autour de son axe.* La figure 685 *A* représente la disposition de l'appareil. *AB* est un aimant lesté par un appendice en platine *BC*, et garni à sa partie supérieure d'un godet plein de mercure; l'aimant est placé dans un vase *M* rempli de mercure, qui renferme à la hauteur du niveau du mercure un anneau métallique d'un diamètre peu différent de celui du vase, et qui communique avec un des pôles d'une pile; l'autre est mis en communication avec la capsule qui termine l'aimant. Aussitôt que le circuit est fermé, l'aimant tourne rapidement sur lui-même, dans le sens déterminé par l'action des courants qui s'établissent à la surface du mercure, sur le pôle voisin. Dans la disposition de l'appareil, il semble que les courants forment des circuits fermés fixes, que par conséquent la résultante totale doit passer par le pôle de l'aimant, et que par suite la rotation est impossible: mais il faut remarquer que la partie du circuit qui passe à travers l'aimant est sans

Digitized by Google

action sur lui : car les actions réciproques qui s'exercent entre les molécules d'un même corps ne peuvent lui imprimer aucun mouvement. Ainsi le circuit est réellement terminé aux points où il entre et où il sort de l'aimant : par conséquent, la résultante totale est nécessairement en dehors de l'aimant. Il tourne en effet, parce que l'aimant est toujours disposé de la même manière par rapport aux courants qui agissent sur lui ; et le sens du mouvement peut être déterminé ou par l'action des courants extérieurs qui rayonnent dans le mercure (fig. 684), ou en considérant l'action de la partie du courant qui passe à travers l'aimant : car, si cette partie traversait l'aimant sans être liée avec lui, son action devrait être égale et opposée à celle du reste du circuit, puisque l'action totale du circuit fermé doit être nulle : ainsi la rotation sera opposée à celle qu'on déduirait de l'action des courants qui traversent l'aimant.

Dans le cas dont il s'agit, il est très-facile de calculer le moment de rotation : en effet, nous avons vu précédemment que, quand un courant $L_1 L_2$ (*fig.* 685) était sollicité par un pôle d'un aimant, le moment de rotation était FC (cos θ_2 — cos θ_1) ; le moment relatif à l'autre pôle serait de même FC (cos θ'_2 — cos θ'_1) ; et, comme les actions sont contraires, le moment total de rotation du courant autour de la ligne des pôles sera

$$FC\,(\cos\theta_2 - \cos\theta_1 - \cos\theta'_2 + \cos\theta'_1)\,:$$

le moment de rotation est donc indépendant de la forme et de la grandeur du courant $L_1 L_2$, et ne dépend que de la position de ses extrémités.

Il est facile de voir, d'après cela, que l'action serait nulle si le circuit était fermé (*fig.* 686) : car alors les points L_1 et L_2 coïncideraient, et on aurait $\theta_1 = \theta_2$ et $\theta'_1 = \theta'_2$, ce qui réduirait à zéro le moment de rotation.

Il en serait de même si le courant aboutissait à l'axe de l'aimant (*fig.* 687) : car alors on aurait $\theta_1 = 0$, $\theta'_1 = 0$, $\theta_2 = \pi$, $\theta'_2 = \pi$, ce qui donnerait cos $\theta_1 = 1$, cos $\theta'_1 = 1$, cos $\theta_2 = -1$ et cos $\theta'_2 = -1$, et par conséquent zéro pour le moment de rotation.

Mais, si le courant traversait l'aimant dans des points situés hors de l'axe, la partie du courant qui se trouverait dans l'aimant ne pourrait exercer aucune action sur lui, et le reste du circuit tendrait à faire tourner l'aimant.

Si le point L_1 était sur le prolongement de l'axe, on aurait $\theta_1 = 0$, $\theta'_1 = 0$: par conséquent le moment se réduirait à

$$FC\,(\cos\theta_2 - \cos\theta'_2).$$

Tant que le point L_2 (*fig.* 685) est au-dessus du plan horizontal passant par le point A, le moment ne renferme que la différence des cosinus, et il devient très-petit quand le point L_2 est très-voisin de l'axe.

Quand le point L_2 est dans le plan horizontal mené par le point A, cos $\theta_2 = 0$, et le moment se réduit à $-FC$ cos θ'_2.

Quand le point L_2 tombe entre ce plan horizontal et celui qui passe par le point B, cos θ_2 devient négatif, et le moment devient

$$-FC\,(\cos\theta_2 + \cos\theta'_2).$$

Il est facile de voir que, quand le point L_2, restant à la même hauteur, se rapprochera de l'aimant, le moment augmentera, et qu'en supposant qu'il reste à la même distance et qu'il s'abaisse, le moment atteindra son maximum quand il sera au milieu de l'aimant, et que les valeurs du moment restent les mêmes quand L_2 est à égale distance du milieu, au-dessus ou au-dessous. Quand le point L_2 est au milieu de l'aimant, la valeur du moment devient $-2FC$ cos θ'_2, dont la valeur absolue est d'autant plus grande que le point L_2 est plus voisin de l'axe.

Il résulte évidemment de la valeur du moment que le sens de la rotation reste le même

Digitized by Google

quelle que soit la position du point L_2, et qu'elle devient très-petite quand il est au-dessous de l'aimant et qu'il est très-voisin de l'axe.

Si on voulait terminer le courant à l'axe de l'aimant, et à une distance de son axe plus grande que son rayon, il faudrait employer la disposition *fig.* 688, dans laquelle L_2 représente une rigole annulaire pleine de mercure et fixée à l'aimant : la partie efficace du courant serait évidemment terminée aux points L_1 et L_2. Avec deux rigoles on limiterait le courant à des hauteurs et des distances quelconques de l'aimant.

1098. *Rotation d'un aimant autour d'un conducteur parallèle à son axe.* On emploie la même disposition que précédemment; seulement on fait arriver le courant dans le mercure par une tige centrale MN (*fig.* 689) : aussitôt que le circuit est fermé, l'aimant tourne autour du conducteur MN. Pour expliquer ces mouvements, considérons les courants qui rayonnent à la surface du mercure (fig. 690), et occupons-nous d'abord des deux courants tangents PA et PA'. Le courant PA' attire la partie de chacun des courants de l'aimant qui tourne sa convexité vers ce courant, puisque le mouvement de l'électricité y a lieu dans le même sens, et il repousse les parties des autres éléments de courants, mais avec une moindre intensité, parce qu'ils en sont plus éloignés; au contraire, le courant PA repousse les éléments des courants de l'aimant les plus voisins et attire les autres. Or l'action attractive du premier courant est dirigée suivant Om', et l'action répulsive du second est dirigée suivant Om : par conséquent la résultante totale de ces deux forces sera dirigée suivant TT', perpendiculaire à OP, et tendra à faire mouvoir l'aimant dans le sens OT'. Si on prend deux autres courants PB et PB', symétriquement placés par rapport au courant passant par le centre de l'aimant, les mêmes raisonnements feront voir que la résultante de leur action sera également dirigée suivant OT'. Quant aux courants que traverse l'aimant, on peut les partager chacun en trois parties : l'une du point P à l'aimant, la seconde dans l'intérieur de l'aimant, la troisième depuis l'aimant jusqu'à l'anneau *efd*. La seconde portion sera sans effet, parce qu'elle ne produira que des attractions et des répulsions réciproques entre les particules de l'aimant, et que de pareilles forces ne peuvent lui imprimer aucun mouvement; mais en examinant les actions de la première et de la dernière partie dans deux courants symétriquement placés par rapport à ce courant PO, on trouvera que la résultante totale de ces actions est dirigée suivant OT'. Ainsi les actions de tous les courants qui traversent le mercure concourent à faire tourner l'aimant autour du point P dans le sens OT'. L'aimant est en outre soumis à l'action du courant vertical MN, qui tend à le faire tourner sur lui-même; mais, comme cette action est très-faible, le frottement s'oppose souvent à ce qu'elle produise un effet appréciable.

1099. On a fait à cette explication, dans le cas où la surface de l'aimant est couverte de vernis, une objection qu'il est important de prévenir. Si l'aimant était couvert de vernis, les courants ne le traverseraient pas, et tous les courants établis dans le mercure et ceux qui parcourent le reste du circuit formeraient des circuits fermés; or nous savons que la résultante totale d'un circuit fermé sur le pôle d'un aimant passe par ce pôle, et Ampère a démontré que la rotation continue d'un aimant par un circuit fixe et fermé n'était pas possible, attendu qu'il y avait toujours une position de l'aimant pour laquelle la résultante coupait l'axe de rotation, et par conséquent que l'effet du circuit fermé se bornait à amener l'aimant dans une position fixe. Mais il faut remarquer qu'ici l'aimant, en marchant vers la position d'équilibre qui résulte de l'action du circuit, le déplace continuellement, en supprimant des courants dans des parties de la surface du mercure où il en existait, et en établissant des courants dans des parties qui en étaient dépourvues : par conséquent le circuit

Digitized by Google

total, quoique fixe en apparence, se meut avec l'aimant, et, la position d'équilibre se déplaçant en même temps, on conçoit alors que la rotation continue devient possible et qu'elle sera déterminée par l'action des parties voisines, qui sont toujours plus efficaces que les parties éloignées quand il n'y a pas équilibre.

1100. Il résulte de cette explication que, si l'aimant ne plongeait pas dans le mercure, il ne tournerait pas. C'est ce qui a été vérifié par Ampère : en suspendant l'aimant au-dessus du mercure par un fil de soie très-fin, et faisant arriver le courant par un fil de cuivre qui traverse le mercure de bas en haut et qui est environné de résine, les courants rayonnants s'établissent sur le mercure, le mercure tourne; mais l'aimant reste immobile. Le premier effet paraît singulier, car il semble que l'aimant ne doit pas faire tourner le mercure sans que l'aimant éprouve une réaction qui tende à le faire tourner en sens contraire. Cela est vrai; mais, le reste du circuit tendant à le faire tourner en sens opposé, il reste immobile; il n'en est pas ainsi du circuit, attendu que les deux parties, qui tendent à se mouvoir en sens contraire, ne sont pas solidaires. On peut arriver au même résultat d'une manière plus simple. On prend un anneau de bois épais et on enroule autour un fil de cuivre, de manière à former une hélice circulaire (*fig.* 691); on place cette hélice horizontalement, et on suspend au-dessus, par un fil de soie, une aiguille aimantée ayant les mêmes pôles aux extrémités, et par conséquent un point conséquent au milieu : en faisant passer un courant par le fil, dans chaque position de l'aiguille elle est soumise à des courants qui ont la même position, et cependant elle ne tourne pas.

1101. *Aimantation des aiguilles d'acier par les courants.* L'action qui existe entre un courant électrique et une aiguille aimantée devait faire présumer que les courants doivent développer du magnétisme dans les corps qui sont susceptibles d'acquérir cette singulière modification. M. Arago reconnut le premier que, si on mettait un conducteur en contact avec de la limaille de fer, elle s'attachait à lui comme à un aimant, mais qu'à l'instant où le courant cessait de passer à travers le conducteur, la limaille, obéissant à sa pesanteur, s'en détachait. Ainsi la limaille avait été aimantée, mais elle ne conservait son magnétisme que sous l'influence de la cause qui l'avait développé : le courant se comportait alors comme un aimant. Il y a cependant une différence très-remarquable entre la manière dont la limaille s'attache à un conducteur et à un aimant : sur le conducteur les parcelles de limaille sont appliquées par leurs milieux et transversalement, tandis que sur l'aimant elles sont fixées normalement dans le sens de leur plus grande dimension, et forment une masse hérissée. Pour concevoir la cause de cette différence, il faut remarquer que, par l'action d'un conducteur et d'un aimant, chaque parcelle de limaille devient un petit aimant; mais, quand ces parcelles sont soumises à l'action d'un aimant, chaque pôle de l'aimant attire un des pôles de la limaille et repousse l'autre; tandis que, quand la limaille est soumise à l'action d'un courant, il attire ou repousse les deux pôles suivant leur position par rapport à la direction du courant : alors, dans ce dernier cas, les parcelles de limaille doivent se diriger perpendiculairement au conducteur, de manière que le pôle austral soit à gauche du courant, et elles doivent s'y appliquer par leur milieu.

Plus tard on reconnut que des aiguilles d'acier devenaient magnétiques quand elles étaient dans le voisinage d'un courant, et souvent même jusqu'à saturation lorsque leur direction était perpendiculaire à celle du courant, qu'elles avaient de petites dimensions et que le courant était assez fort. D'après cela, il est évident qu'en entourant l'aignille d'une série de petites cercles (*fig.* 692), dans lesquels on ferait passer un courant électrique dans le même sens, on devait obtenir un plus grand développement de magnétisme. C'est en effet ce qui a été reconnu en employant un fil de

Digitized by Google

cuivre tourné en hélice autour d'un tube de verre ou de carton dans l'intérieur duquel on place l'aiguille.

1102. Ce phénomène fournit une vérification très-remarquable de l'hypothèse d'Ampère sur la constitution des aimants : car nous allons voir que la position des pôles et celle des points conséquents qui se forment dans certaines circonstances sont parfaitement d'accord avec la théorie de ce savant physicien.

Avant d'étudier la nature des pôles formés dans une aiguille d'acier placée dans un conducteur contourné en hélice, il est nécessaire d'établir une distinction importante sur les deux espèces d'hélices qui peuvent être formées. Concevons un tube horizontal sur lequel on enroule un fil de cuivre, en commençant par la partie du tube la plus voisine et s'éloignant continuellement : l'enroulement peut avoir lieu de gauche à droite en dessus, ou de gauche à droite en dessous (*fig.* 693 et 694). On obtient ainsi deux espèces d'hélices symétriques qui ne peuvent jamais coïncider, et que l'on désigne sous les noms de *dextrorsum* et de *sinistrorsum ;* les tire-bouchons et toutes les vis sont dextrorsum.

Lorsqu'on emploie une hélice dextrorsum, le pôle boréal de l'aiguille est toujours à l'extrémité par laquelle entre le courant. Dans la théorie d'Ampère la raison en est facile à saisir : car alors, de quelque côté que le courant pénètre, il est disposé comme ceux qui existent dans un aimant parallèle dont le pôle boréal serait du côté où entre le courant. Au contraire, si on prend une hélice sinistrorsum, les courants circulaires seront disposés comme ils le sont dans une aiguille aimantée parallèle, dans laquelle le pôle boréal serait du côté opposé à l'entrée du courant. Si on enroule le fil de manière qu'il forme successivement des hélices dextrorsum et sinistrorsum (*fig.* 695), il se forme un point conséquent à chaque changement de direction du fil. Ce dernier fait est encore une conséquence évidente de la théorie d'Ampère.

1103. Mais, si on fait passer le courant à travers une aiguille déjà aimantée et dans le sens de sa longueur, la puissance magnétique de l'aiguille est toujours diminuée, et elle disparaît complétement si l'aiguille n'a que de petites dimensions et si le courant est assez énergique.

1104. *Aimantation du fer doux par les courants.* Le fer doux, sous l'influence des courants électriques, acquiert la puissance magnétique à un très-haut degré. Pour produire cette aimantation on emploie des barres de fer doux droites ou courbées en fer à cheval, et autour desquelles on enroule un fil de cuivre, de manière que les spires ne soient en communication métallique ni entre elles ni avec le barreau : quand la pile n'a qu'un seul élément ou n'en a qu'un très-petit nombre, on se sert d'un très-gros fil ayant par exemple 3 à 5 millimètres de diamètre ; on colle plusieurs feuilles de papier sur le barreau et on enroule le fil de cuivre de manière que les spires ne se touchent pas ; quand au contraire la pile a un grand nombre d'éléments, on emploie des fils plus fins, très-longs, recouverts de soie, qu'on enroule autour des barreaux ; dans tous les cas, il faut employer des barreaux ayant un très-grand diamètre, attendu que l'influence de ce diamètre est beaucoup plus grande que celle de l'intensité du courant. Nous rapporterons seulement deux expériences qui feront juger de la puissance magnétique développée. Un fer à cheval de 51 millimètres de diamètre, couvert de soie et de deux hélices nues de 5 millimètres de diamètre, a supporté 76 liv. avec un élément de 70 cent. carrés (Moll). Un fer à cheval de 2 pouces et demi de diamètre, entouré d'un fil de fer de 4000 pieds de longueur, a porté 450 k. avec une pile à un grand nombre d'éléments. On a reconnu que le plus grand effet a lieu à l'instant où l'on ferme le circuit ; que pour des fils gros et courts le nombre des éléments est sans influence ; que quand on change la direction du courant le changement des pôles a lieu instantanément ; et enfin que quand le courant cesse, sous l'influence

Digitized by Google

de l'armature une grande partie de l'aimantation subsiste. Un fer à cheval qui portait 60 k. soutint encore 25 k., 5 pendant plusieurs semaines après la cessation du courant; mais tout le magnétisme disparaissait à l'instant de la séparation de l'armature (Watkins).

1105. *Machine mue par le magnétisme que développent les courants.* Le développement du magnétisme dans le fer doux par l'action des courants a été employé pour faire mouvoir des machines au moyen desquelles on pourrait obtenir une grande puissance dynamique. Pour comprendre le principe de ces appareils, imaginons des barres égales de fer doux, en nombre pair, placées perpendiculairement à la circonférence d'un plateau fixe, et supposons que ces barres soient entourées d'un même fil de cuivre recouvert de soie, en sens contraire dans les barreaux consécutifs, et dont les extrémités communiquent avec les pôles d'une pile. Tous ces barreaux deviendront magnétiques et auront successivement les pôles contraires placés du même côté. Supposons maintenant qu'un autre plateau, de même diamètre, mobile sur la verticale du centre du premier, soit garni en dessous d'un même nombre de barreaux de fer doux, de même longueur et entourés de fils de cuivre comme les barreaux du premier plateau, et supposons que, dans la rotation du plateau supérieur, les extrémités des barreaux mobiles passent très-près des extrémités des barreaux fixes; enfin supposons que par un mécanisme convenablement disposé le sens du courant qui parcourt les fils qui environnent les barreaux supérieurs ou inférieurs soit changé toutes les fois que les barreaux mobiles passent au-dessus des barreaux fixes. Il est facile de reconnaître que le plateau mobile prendra un mouvement continu de rotation. M. Jacobi a construit un appareil disposé comme nous venons de l'indiquer : chaque système de barreau en contenait 8; chacun d'eux avait 7 pouces de longueur et 1 pouce 1/2 de diamètre; les 16 barreaux étaient entourés de 320 pieds de fil de cuivre d'une ligne un quart de diamètre. En mesurant l'effet produit par cette machine au moyen du frein de M. Prony, on trouva qu'il était représenté par un poids de 10 à 12 livres, élevé à une hauteur de 1 pied par seconde. M. Jacobi n'a point donné les dimensions de la pile qu'il a employée, mais le liquide conducteur était si peu acidulé que le développement de gaz était à peine sensible ainsi que l'oxydation du zinc. Il serait important de faire de nouveaux essais, en employant des barres de plus grandes dimensions et des piles dont on mesurerait la dépense en acide et en zinc, pour savoir si ce moteur pourrait réellement être employé sur une grande échelle et s'il serait moins coûteux que ceux qu'on a employés jusqu'ici. Cela serait d'autant plus important que ce moteur serait d'une grande simplicité, qu'il n'exigerait aucune surveillance, et que son usage ne présenterait aucune chance d'accidents.

1106. Les gros barreaux d'acier trempés ou recuits ne deviennent que faiblement magnétiques sous l'influence des courants; mais en se servant de barreaux de fer aimantés par des courants, et de la méthode de la double touche, on aimante facilement les barreaux d'acier : cela tient probablement à ce que pour vaincre la force coercitive il faut non-seulement de grandes puissances magnétiques, mais encore le mode d'ébranlement qui est produit par la friction.

On peut aussi communiquer à des barreaux d'acier un magnétisme intense et permanent, en les mettant en contact à la chaleur rouge avec un fer à cheval en fer doux, aimanté par des courants, et plongeant le barreau d'acier dans l'eau. La trempe ayant lieu lorsque le barreau est fortement magnétique, cet état subsiste après la trempe (M. Aimé).

1107. *Instruments destinés à mesurer l'intensité des courants.* Les instruments dont il est question sont généralement désignés sous le nom *galvanomètres.* Cette désignation impropre a en outre l'inconvénient de rappeler le nom de Galvani à

Digitized by Google

propos de phénomènes dont il n'a fait que provoquer la découverte. Le seul nom convenable à ces instruments est celui de *rhéomètres,* mesure de courants : c'est celui que nous emploierons désormais.

Le rhéomètre le plus simple consiste en une boussole au-dessus de laquelle se trouve un fil métallique fixe, dirigé dans le méridien magnétique, et à travers lequel on fait passer les courants dont on veut mesurer l'intensité. L'aiguille sera d'autant plus déviée que le courant sera plus énergique, et la limite d'écart sera évidemment 90°. Il résulte de la formule (1089) que, pour un même courant, la déviation est indépendante de l'intensité magnétique de l'aiguille, qu'elle diminue avec sa longueur, et que, pour une même aiguille et un même courant, la déviation varie avec la plus courte distance du courant à l'aiguille, de manière qu'il existe un maximum à une distance finie; c'est ce qu'on peut d'ailleurs vérifier en éloignant progressivement et dans le même plan vertical le fil de l'aiguille : la déviation augmente jusqu'à une certaine distance, au delà de laquelle elle diminue. Cet effet singulier résulte de ce que l'action exercée sur l'aiguille est perpendiculaire à la plus courte distance du pôle de l'aiguille au fil, et que cette résultante s'incline sur le plan que parcourt l'aiguille, d'autant plus que le fil s'éloigne davantage, circonstance qui, jusqu'à une certaine limite, augmente plus la composante horizontale qu'elle ne la diminue par l'accroissement de la distance. On pourrait déduire l'intensité des courants de la déviation au moyen de la formule citée. Il faudrait, pour cela, par des expériences préliminaires faites sur des courants dont les intensités relatives seraient connues, trouver les valeurs des constantes qu'elle renferme ; mais ce mode de détermination de l'intensité des courants ne serait pas commode, la formule étant assez compliquée. Mais on peut disposer l'appareil de manière à obtenir le rapport des intensités des courants par une opération facile à exécuter. On peut d'abord suspendre l'aiguille à un fil métallique élastique fixé à une aiguille mobile au centre d'un cadran divisé : en ramenant l'aiguille dans le méridien magnétique par la torsion du fil, les intensités des courants seront évidemment proportionnelles aux angles de torsion. On pourrait aussi suspendre l'aiguille sur une pointe ou à un fil de soie, et faire mouvoir le courant de manière que le fil fasse toujours le même angle avec l'aiguille : les intensités seraient alors proportionnelles aux sinus des angles de déviation de l'aiguille sur le méridien magnétique. L'une quelconque de ces dispositions pourrait alors servir à trouver une fois pour toutes les intensités correspondantes aux déviations d'un rhéomètre dont l'aiguille serait suspendue par un fil de soie ou sur une pointe, et dont le conducteur serait fixe : il suffirait pour cela de faire passer simultanément des courants de différentes intensités à travers les deux instruments. On obtiendrait ainsi différents points de la courbe dont les abscisses et les ordonnées représenteraient les uns les déviations, les autres les intensités : il serait donc facile de tracer cette courbe et de faire une table représentant les intensités correspondantes aux déviations.

On peut aussi disposer l'appareil de manière que les intensités des courants soient proportionnelles aux tangentes des déviations : il suffit pour cela de remplacer le fil par une plaque mince d'une épaisseur uniforme, et terminée par deux bords parallèles ayant une longueur égale à cinq ou six fois la largeur, et d'employer une aiguille très-courte, ayant par exemple 1/4 de la largeur de la plaque, et placée très-près. Le courant, en traversant la lame mince, se répartit également dans toute son étendue, comme nous le verrons plus loin ; ce courant pouvant alors être considéré comme formé d'une infinité de courants égaux et parallèles, l'action exercée sur l'aiguille est toujours la même, quelle que soit sa déviation ; et il est facile de reconnaître, en considérant les forces qui agissent dans l'état d'équilibre, que les intensités des courants sont alors dans le rapport énoncé.

Digitized by Google

En effet, en désignant par f l'intensité magnétique de l'aiguille, par F celle de la terre, par Q l'intensité du courant, et par φ la déviation, la force directrice de l'aiguille sera $Ff \sin \varphi$; et, la force résultant de l'action du courant sur l'aiguille étant appliquée au pôle de l'aiguille, et perpendiculairement à la direction du courant, la composante (*fig.* 696) perpendiculaire à la direction de l'aiguille sera $Qf \cos \varphi$: on aura donc

$$Ff \sin \varphi = Qf \cos \varphi, \quad \text{d'où} \quad Q = F \operatorname{tang} \varphi.$$

Cette relation suppose cependant que l'action des courants placés sur les bords de la plaque est sensiblement nulle, ce qui n'existe pas; mais, quand la plaque a une largeur trois ou quatre fois plus grande que la longueur de l'aiguille, et que l'aiguille est très-voisine de la plaque, l'influence des courants extrêmes est sensiblement nulle.

1108. Les appareils que nous venons de décrire ne sont pas d'une grande sensibilité, et par conséquent ne pourraient pas être employés pour des courants très-faibles. On peut l'augmenter beaucoup en employant deux aiguilles formant un système astatique (*fig.* 697), mais assez écartées l'une de l'autre pour que l'on puisse négliger l'action du courant sur celle qui est la plus éloignée. Mais on obtient une sensibilité beaucoup plus grande encore en ajoutant à ce moyen une disposition due à Schweiger, et qui consiste à tourner plusieurs fois le fil autour de l'aiguille inférieure (*fig.* 697 *A*) : toutes les parties du circuit concourent à faire dévier l'aiguille dans le même sens. C'est ce qu'il est facile de déduire de ce qui précède. On conçoit alors que, si l'allongement du fil ne diminuait pas l'intensité du courant qui le traverse, en augmentant le nombre des circonvolutions du fil, et en les isolant de manière que le courant soit toujours obligé de parcourir le fil dans toute sa longueur, on pourrait augmenter indéfiniment la sensibilité des appareils, mais il n'en est pas ainsi. Pour certaines espèces de courants l'influence de l'accroissement de longueur du circuit est faible, du moins jusqu'à une certaine limite; pour d'autres, au contraire, elle est très-grande; et, comme, à mesure que les circonvolutions se multiplient, elles s'éloignent nécessairement de l'aiguille, les courants qui les parcourent ont une influence décroissante. Il résulte de ces deux circonstances qu'il doit exister pour chaque espèce de courants une limite au nombre des circonvolutions, qui donne le maximum de déviation. On emploie toujours des fils de cuivre rouge, recouverts de soie sur toute leur étendue, et on étale les circonvolutions de manière que les fils forment des plaques à peu près de la largeur de l'aiguille. Pour les courants qui proviennent de l'action des corps les uns sur les autres, et où se trouve un liquide, et que pour cette raison on désigne sous le nom d'*hydro-électriques*, on emploie ordinairement des rhéomètres à 4 ou 6 cents tours formés d'un fil de cuivre de 1/3 de millimètre de diamètre. Pour les courants provenants de la chaleur, que nous décrirons bientôt, et qu'on désigne sous le nom de *thermo-électriques*, on emploie des appareils d'un plus petit nombre de tours formés de fils de cuivre d'un plus grand diamètre; enfin, pour les courants provenant de l'électricité à grande tension, celle des machines électriques, ou qui résulte du frottement, on se sert de rhéomètres à fils très-fins, doublement recouverts de soie et de vernis à la gomme laque, et qui ont jusqu'à 2000 et 3000 tours. Dans tous les cas, on enroule les fils sur un cadre en cuivre, d'une manière régulière, et on pratique sur la couche supérieure des fils, et au centre, en les écartant, un orifice allongé, par lequel on introduit l'aiguille, qui doit se trouver au milieu des circonvolutions. Il est plus avantageux d'étaler les fils sur une grande largeur que de les ramasser dans une petite étendue, parce que les déviations croissent alors suivant une loi moins rapide; il est même facile de voir, d'après ce que nous avons dit précédemment, que, si l'aiguille était

Digitized by Google

plus petite que la largeur et la longueur des couches de fils, les déviations devraient suivre sensiblement la loi des tangentes, comme dans les rhéomètres simples à plaques. L'aiguille supérieure est également dirigée par les courants, mais elle ne se déplace que par la différence des actions qu'elle éprouve de la part des couches supérieures et inférieures des fils; et, comme l'action des fils voisins l'emporte sur celle des autres, cette aiguille est déviée dans le même sens que l'aiguille inférieure.

On place ordinairement le cadran sur une plaque de cuivre rouge fixée au-dessus du faisceau, en dessous et très-près de l'aiguille supérieure; cette plaque est percée d'une fente parallèle à l'ouverture pratiquée dans la couche supérieure des fils, afin de permettre l'introduction de l'aiguille inférieure au centre des circonvolutions. La plaque de cuivre a pour objet d'anéantir très-rapidement les oscillations du système des aiguilles (847) : sans cette disposition, l'aiguille reste longtemps avant de se fixer, ce qui est toujours un grand inconvénient. Lorsque l'instrument doit avoir une très-grande sensibilité, il faut que le système des deux aiguilles soit aussi astatique que possible; pour cela, on aimante à saturation des aiguilles égales, on les fait osciller séparément et on accouple celles qui font le même nombre d'oscillations. On emploie, pour suspendre les aiguilles, des fils de cocons simples décreusés dans de l'eau de savon, afin de rendre presque nulle leur force de torsion. Il faut aussi essayer d'avance si les fils de cuivre sont eux-mêmes magnétiques, et n'employer que ceux qui n'agissent pas sensiblement sur une aiguille astatique : car autrement l'aiguille du rhéomètre a trois positions d'équilibre, une de chaque côté du zéro de la division, et qui proviennent de l'action magnétique des faisceaux de fils placés à droite et à gauche (Nobili). Il est probable que cette action magnétique du cuivre provient du fer allié à ce métal, car on rencontre des morceaux de cuivre qui ne sont nullement magnétiques.

Les rhéomètres multiplicateurs peuvent être disposés de manière à donner la mesure de l'intensité des courants par la torsion ou la déviation du système des fils, comme dans les rhéomètres simples; on peut aussi former une table des intensités correspondantes aux différentes déviations, en faisant passer simultanément des courants dans un rhéomètre à torsion et un instrument ordinaire; mais la méthode la plus simple et la plus commode sera exposée lorsqu'il sera question des courants thermo-électriques.

La figure 698 représente un rhéomètre multiplicateur disposé de la manière la plus simple; d'après ce que nous avons dit, l'inspection seule de la figure suffit pour en faire comprendre la disposition. La figure 699 représente un rhéomètre multiplicateur destiné à mesurer les intensités des courants en établissant une déviation constante de l'aiguille sur la direction des fils; le cadran *ab* est fixé sur le système des fils, et celui-ci repose sur une pièce *mnpq*, qu'on peut faire tourner sur elle-même et qui est traversée par les extrémités du fil; une aiguille *fd*, fixée au support *gh*, sert à mesurer la déviation du système des fils sur sa position primitive, et la pince *ik*, mobile autour de la charnière *k*, sert à fixer le système des aiguilles quand on transporte l'instrument.

1109. *Circonstances qui font varier l'intensité du courant produit par les piles.* D'après Marianini, l'intensité du courant est proportionnelle à la surface des éléments, quelle que soit la force de la pile; d'après d'autres physiciens, l'augmentation d'intensité qui résulte de la plus grande étendue des surfaces croît dans un plus grand rapport que la surface quand le courant est faible. Je regarde comme très-probable que la loi de Marianini est vraie quant à l'électricité développée par la pile; mais, pour que l'effet produit suive cette loi, il faut que le conducteur puisse laisser passer toute l'électricité qui se développe, et on conçoit aisément que, pour

Digitized by Google

une pile donnée et une longueur de fil constante, il y a toujours un diamètre du fil au-dessous duquel le fil, quelle que soit sa nature, ne décharge la pile que partiellement.

1110. Plusieurs physiciens ont reconnu qu'une pile quelconque formée d'éléments égaux donne un courant ayant la même intensité qu'un seul de ses éléments ou un nombre quelconque d'entre eux; mais il faut ajouter la condition que le circuit sera formé d'un fil métallique assez court et assez gros pour décharger complétement un seul élément : car, dans le cas contraire, l'intensité du courant augmente avec le nombre des éléments. Tout porte à croire que la quantité d'électricité développée dans une pile est la même que dans un seul élément, et que, quand le circuit est fermé, il reste toujours aux pôles une certaine tension croissante avec le nombre des éléments, qui peut alors vaincre des résistances d'autant plus grandes que le nombre des éléments est plus considérable. Aussi on emploie toujours des piles à grande surface et à un petit nombre d'éléments quand le circuit est formé d'un fil métallique gros et court, et des piles à un grand nombre d'éléments quand le circuit est formé d'un fil très-fin et très-long, ou d'un corps faiblement conducteur, tel que les liquides.

1111. Le maximum d'intensité du courant produit par une pile a lieu à l'instant de la fermeture du circuit. On doit à M. Matteucci les observations suivantes : 1° la diminution d'intensité du courant est d'abord très-rapide, et d'autant plus que le courant est plus puissant; 2° cette diminution continue pendant un temps plus ou moins long, après lequel l'intensité reste constante pendant un temps considérable; 3° le temps nécessaire pour parvenir à cet état permanent est proportionnel à l'intensité primitive du courant, et d'autant plus long que la pile renferme un plus grand nombre d'éléments; 4° les piles chargées d'avance et dont on n'a point fermé le circuit atteignent plus vite le terme où l'intensité du courant est constante; 5° une pile parvenue au point où son effet est permanent recouvre, lorsqu'on interrompt le circuit, une partie de la force qu'elle avait perdue; et, en rétablissant les communications, le courant reprend une partie de son intensité primitive, d'autant plus grande que la durée de l'interruption a été plus grande. M. Faraday avait annoncé que cette diminution d'intensité après la fermeture du circuit provenait des décompositions chimiques, qui accumulaient sur les faces en regard des éléments voisins des acides et des alcalis, substances qui par leur réaction tendaient à produire des courants en sens contraire. M. Matteucci pensait que l'effet dont il est question provenait du défaut d'homogénéité des liquides, qui, comme nous le verrons, diminue beaucoup la conductibilité; mais ces deux explications ne sont pas admissibles : car, si on forme une pile avec des disques montés sur un axe horizontal, et qui plongent dans des auges pleines de liquide et garnies de brosses, la rotation permanente laisse subsister la diminution d'intensité du courant dont il est question. Il est probable que le phénomène dont il s'agit provient de l'électricité qui s'accumule aux pôles pour y produire la tension, électricité qui s'écoule dans les premiers instants que le circuit est fermé, et qui ne se reproduit qu'après un temps suffisant, lorsque le circuit est interrompu.

1112. Quant au liquide employé pour monter la pile, on a trouvé que les dissolutions salines neutres agissent avec moins d'énergie que les dissolutions de sels acides, et ces dernières, à quelques exceptions près, moins que les acides, et surtout l'acide nitrique; et enfin que l'intensité du courant augmente avec la quantité de matière dissoute dans l'eau, excepté pour l'acide sulfurique, dont le maximum d'action a lieu lorsqu'il est combiné avec 0, 50 ou 0, 70 d'eau. Le mélange le plus convenable pour obtenir un courant d'une grande intensité, sans dissoudre trop de zinc, est formé

Digitized by Google

d'eau renfermant 1/80 d'acide sulfurique et 1/80 d'acide nitrique. Pour une même pile montée avec le même liquide, la force du courant augmente beaucoup quand on échauffe le liquide.

§ V. *Effets calorifiques produits par les courants.*

1113. Les effets que produisent les courants dans un fil métallique qu'ils traversent sont les mêmes que ceux que nous avons observés dans les mêmes circonstances pour les décharges des batteries électriques (956) : suivant la nature et la ténuité des fils, ils s'échauffent, rougissent, fondent, brûlent ou se volatilisent. En soudant un fil de platine de $0^{mm},5$ de diamètre à l'extrémité de chacun des fils polaires d'une pile de dix éléments, et en fixant une des extrémités des fils de platine à un morceau de charbon, qui a été jeté incandescent dans le mercure afin d'en augmenter la conductibilité, et le touchant avec l'autre fil, la chaleur est assez intense pour fondre le fil de platine. On a reconnu que, quand les fils sont très-courts, le maximum de température se trouve au milieu de leur longueur; que, quand un fil est très-long et homogène, l'échauffement est le même dans toute son étendue, excepté vers les extrémités : cette dernière circonstance provient probablement de la perte de chaleur par les supports du fil; et enfin que l'échauffement reste le même quand une partie du fil est plongée dans l'eau. En parlant des courants thermo-électriques, nous indiquerons comment ces expériences ont été faites.

Pour produire l'incandescence des fils d'un grand diamètre, il faut des appareils très-puissants; mais, lorsqu'on emploie des fils d'une grande ténuité, de très-petites piles peuvent suffire : avec un couple dont la lame de zinc a 5 à 6 centimètres de largeur sur 10 de hauteur on peut rendre incandescent un fil de platine de 1/10 de millimètre de diamètre (*fig.* 700).

1114. Wollaston est même parvenu, avec un seul couple de la dimension d'un dé à coudre, à produire l'incandescence d'un fil de platine d'une finesse extrême, et qu'il obtenait par le procédé suivant : il plaçait un fil de platine dans l'axe d'un moule cylindrique, dans lequel il coulait ensuite de l'argent; en tirant ce cylindre d'argent au laminoir, il obtenait un fil très-délié, qui renfermait un fil de platine plus délié encore; en plongeant ce fil dans l'acide nitrique, l'argent était dissous, et il restait un fil de platine à peine visible, dont le diamètre quelquefois n'excédait pas 1/1000 de millimètre. Le même procédé pourrait servir à faire des fils de fer, mais il faudrait se servir du mercure pour dissoudre l'argent.

1115. En employant de très-fortes piles, telle que celle de l'institution royale de Londres, qui est formée de 2000 couples de 4 pouces de côté, Davy a reconnu que, si l'on fait communiquer avec les pôles de petits cônes de charbon sec, lorsqu'ils sont à une petite distance, la continuité des décharges forme entre les deux pointes un jet de lumière continu, d'un éclat supérieur à celui de toutes les autres lumières, et d'une température si élevée que le diamant et la plombagine y sont volatilisés; les pointes de charbon peuvent alors être éloignées jusqu'à la distance de 4 pouces, sans que le jet lumineux soit interrompu. Dans l'air raréfié ou dans le vide, ces phénomènes ont encore lieu et avec plus d'intensité; dans cette dernière circonstance, l'expérience peut durer plusieurs heures sans que le charbon diminue d'une quantité sensible.

On peut faire l'expérience de la manière suivante : on prend un ballon à deux tubulures (*fig.* 701); une d'elle est garnie d'une boîte à cuir dans laquelle passe une forte tige métallique qui peut s'enfoncer à volonté, l'autre tubulure porte une tige métallique fixe et un robinet; à l'extrémité de chaque tige on attache un petit cône de charbon fortement calciné et éteint dans le mercure; les cônes de charbon doivent

Digitized by Google

être disposés de manière qu'ils touchent les tiges par une grande surface et que leurs extrémités soient très-voisines ; on fait communiquer le ballon, par la tubulure inférieure, avec une machine pneumatique pour y faire le vide ; ensuite on fait communiquer les tiges avec une forte pile : le courant franchit la distance des cônes, et la lumière devient éblouissante ; cette lumière combine le chlore et l'hydrogène, et agit sur le chlorure d'argent comme la lumière solaire.

Lorsqu'on met les extrémités d'une pile en contact avec des fils métalliques de différente nature, et qu'on approche les extrémités libres à une très-petite distance, il s'établit un courant continu d'étincelles, et il se présente des phénomènes remarquables, qui varient avec la nature des métaux. Lorsqu'un des fils est en or, l'autre en platine, le platine devient rouge-blanc, et l'or ne change pas ; un des fils étant en or et l'autre en argent, l'or seul entre en ignition. Lorsque les fils sont en or et en cuivre, tous deux rougissent ; quand ils sont en fer et en platine, le platine devient rouge-blanc et le fer coule. Les fils étant en platine et en zinc, le platine devient rouge-blanc et le zinc ne change pas ; les fils étant en fer et en zinc, le fer coule et le zinc ne fond pas ; enfin, quand les fils sont en zinc et en argent, le zinc entre en ignition et coule, et l'argent ne change pas. Ces phénomènes ont été observés par M. Children : il employait une pile de Wollaston de 21 couples, dans lesquels le zinc avait une surface de 32 pieds ; les fils avaient 8 pouces de long et 1/3 de ligne d'épaisseur.

1116. M. Children, en chargeant la pile avec de l'eau plus acidulée, obtint des effets de chaleur fort extraordinaires : une tige carrée de platine de 2 à 3 pouces de longueur et de 2 lignes de côté entra en fusion ; il parvint à fondre différents oxydes terreux, qui furent en partie réduits. Le docteur Robert-Hare est parvenu à fondre le charbon et la plombagine avec un appareil en hélice de 80 couples.

1117. Les effets calorifiques paraissent provenir de la résistance qu'éprouve l'électricité à être transmise d'un corps à un autre, ou d'une molécule à la suivante ; il semble que c'est la portion de l'électricité qui est arrêtée qui produit le développement de chaleur. Toutes les expériences que nous avons rapportées précédemment confirment cette hypothèse : ainsi, le fil qui réunit les deux pôles s'échauffe d'autant plus qu'il est d'un plus petit diamètre ; quand on réunit les deux pôles d'une pile par une chaîne composée de plusieurs fils métalliques de même nature et de même diamètre, attachés les uns à la suite des autres, c'est toujours aux points d'attache que se manifeste l'incandescence ; quand les fils sont de nature différente, ce sont toujours les fils formés des métaux les moins conducteurs qui s'échauffent davantage ; enfin, quand on fait communiquer les deux pôles de la pile par une tige de plante grasse, elle s'échauffe tellement que l'eau qu'elle renferme finit par entrer en ébullition, probablement parce que le liquide qu'elle contient est séparé par de nombreuses cloisons végétales.

L'interposition des diaphragmes métalliques dans le circuit, qui diminue peu l'action du courant sur l'aiguille aimantée, a une très-grande influence sur le développement de la chaleur. M. de Larive, en faisant passer le courant à travers l'hélice d'un thermomètre de Breguet, et intercalant dans le circuit, qui traversait un vase allongé rempli d'eau salée, successivement 1, 2 et 3 diaphragmes métalliques, obtint, pour la déviation de l'aiguille aimantée, 85, 84, 83°, et pour la déviation de l'aiguille du thermomètre, 312, 170, 73°.

1118. On voit, d'après ce qui précède, qu'il n'est pas nécessaire qu'une pile renferme un grand nombre d'éléments pour produire les effets calorifiques, parce que pour les obtenir on se sert ordinairement de fils métalliques, et que ces conducteurs sont toujours plus parfaits que l'appareil voltaïque, fût-il même composé d'un seul couple. Néanmoins, dans certains cas, comme dans l'expérience des pointes de

Digitized by Google

charbon, où la résistance que le courant électrique peut éprouver est considérable, il faut nécessairement une pile composée d'un grand nombre d'éléments. Mais dans tous les cas les effets calorifiques n'augmentent pas constamment avec l'accroissement du nombre des éléments de la pile ; d'après M. de Larive, ils diminuent lorsqu'on dépasse une certaine limite.

1119. On doit à M. Peltier des expériences extrêmement curieuses sur la production de la chaleur dans un circuit formé de deux métaux. Lorsque deux fils de métaux ductiles sont soudés bout à bout, un même courant, en traversant ces fils, produit des effets de chaleur qui varient avec le sens du courant ; la plus grande chaleur a lieu à la soudure quand le courant passe du meilleur conducteur au plus mauvais : ainsi, quand l'un des fils est en cuivre, l'autre étant en fer, en plomb ou en étain, la plus grande chaleur a lieu quand le courant passe du fil de cuivre dans l'autre fil. Quand un des métaux est du bismuth, de l'antimoine ou du fer à gros grains, et que le courant ne dépasse pas une certaine limite d'intensité, le courant dans certaines directions produit du froid à la soudure : par exemple, un cylindre de bismuth étant soudé par ses deux extrémités à un fil de cuivre communiquant avec les extrémités d'une pile à un seul élément, à la soudure où le courant passe du cuivre au bismuth il y a élévation de température, à l'autre, où le courant passe du bismuth au cuivre, il y a abaissement de température ; en remplaçant le bismuth par l'antimoine, c'est le contraire qui a lieu. En soudant bout à bout deux cylindres, l'un d'antimoine, l'autre de bismuth, quand le courant passe de l'antimoine au bismuth il y a élévation de température, et abaissement quand le courant marche en sens contraire. Ces variations de température ont été observées au moyen d'une pile thermo-électrique, comme nous l'expliquerons plus loin ; mais le refroidissement dans le cas du passage du courant du bismuth à l'antimoine a été constaté directement en plaçant la soudure dans une boule métallique, terminée par un tube de verre capillaire plongé par la partie inférieure dans un liquide coloré (*fig.* 702) : le liquide s'est élevé dans le tube quand le courant passait du bismuth à l'antimoine, et a marché en sens contraire quand le courant passait de l'antimoine au bismuth. Quand le courant augmente d'intensité, il y a élévation de température dans la soudure ; mais elle varie avec le sens du courant.

§ VI. *Effets chimiques produits par les courants.*

1120. *Décomposition de l'eau.* Le premier effet chimique obtenu par les courants électriques continus a été la décomposition de l'eau ; cette importante découverte a été faite par MM. Carlisle et Nickolson. On peut la vérifier en plongeant deux fils de platine communiquant avec les pôles d'une pile dans un vase plein d'eau, tenant en dissolution un sel ou un acide : le gaz oxygène se dégage autour du fil immergé qui communique avec le pôle positif ou zinc, et l'hydrogène se dégage du fil communiquant avec le pôle négatif ou cuivre. Si on employait de l'eau pure, sa faculté conductrice ne serait pas assez grande, et l'eau ne serait pas décomposée ; si on se servait de deux fils d'un métal facilement combustible, l'oxygène se combinerait avec le métal, et l'on obtiendrait seulement un dégagement d'hydrogène. On peut monter l'appareil de manière à recueillir les gaz : il faut, pour cela, mettre l'eau acidulée ou chargée de sels dans un entonnoir (*fig.* 703), dont le fond large est fermé par un bouchon mastiqué, à travers lequel passent deux fils de platine qui s'élèvent à quelques centimètres, et dont les prolongements inférieurs communiquent avec les pôles d'une pile ; en recouvrant les fils avec deux petites cloches pleines de liquide, les gaz dégagés se réunissent dans les cloches, et on peut facilement en déterminer la

Digitized by Google

nature et le volume : on obtient, ainsi que l'indique la composition de l'eau, un volume d'oxygène et deux volumes d'hydrogène. Le dégagement de gaz est presque nul quand l'entonnoir est rempli d'eau pure, et, en général, il est d'autant plus abondant que l'eau renferme plus de sel ou d'acide. MM. Gay-Lussac et Thénard, qui ont fait beaucoup d'expériences pour chercher s'il existait un rapport simple entre les quantités d'eau décomposée et les quantités de sels en dissolution, n'ont obtenu aucun résultat satisfaisant.

L'eau distillée pure, placée dans les mêmes circonstances, donne souvent un acide et une substance alcaline ; ce résultat singulier provient de ce que l'eau qui a été distillée vivement renferme encore souvent des matières salines, et que les vases de verre sont eux-mêmes attaqués par le courant voltaïque ; mais de l'eau distillée lentement dans des vases d'argent, et placée dans des vases d'or pur, ne donne naissance à aucune substance acide ou alcaline (Davy).

1121. Si on plonge dans de l'eau légèrement acidulée par de l'acide sulfurique ou nitrique un fil de zinc et un fil d'argent, tant que les deux fils sont isolés, celui de zinc se dissout et dégage seul de l'hydrogène ; mais, si on les fait toucher extérieurement, tous deux dégagent du gaz hydrogène. Ce phénomène, qui paraît d'abord singulier, s'explique facilement d'après ce qui précède : en effet, quand les fils se touchent il s'établit un courant dans le liquide qui sépare les deux fils ; l'eau est décomposée sur l'un et sur l'autre par la seule influence du courant, l'hydrogène se dégage sur le fil d'argent, et l'oxygène sur le fil de zinc, avec lequel il se combine ; et comme le zinc, par son action directe sur l'eau acidulée, la décompose, une autre portion de ce liquide sera décomposée sur le fil de zinc, qui en absorbera l'oxygène et en dégagera l'hydrogène.

1122. La décomposition de l'eau a lieu dans quelques circonstances particulières lorsque le circuit est fermé métalliquement ; mais cette décomposition est encore facile à expliquer : par exemple, si un fil de zinc et d'argent sont soudés (*fig.* 704) et forment un circuit fermé, quand les points de jonction sont immergés, le dégagement de gaz a lieu sur les deux métaux, parce que l'électricité développée aux points de jonction passe à travers le liquide conducteur environnant et forme encore un courant ; le même effet aurait lieu pour deux plaques qui seraient soudées bout à bout (*fig.* 705) ; ces derniers phénomènes ont été observés par M. Gay-Lussac.

1123. *Décomposition des autres corps.* Cruikshank, en répétant l'expérience de la décomposition de l'eau en employant une dissolution d'acétate de plomb, reconnut que le plomb à l'état métallique se déposait au pôle négatif ; les dissolutions de cuivre et d'argent lui donnèrent des résultats analogues. Davy démontra ensuite que tous les sels solubles et en dissolution étaient décomposés par la pile ; que l'acide se portait au pôle positif, et l'oxyde au pôle négatif. On peut facilement constater ce fait en mettant une dissolution saline colorée en bleu par une infusion de chou rouge (substance qui se colore en rouge par les acides et en vert par les alcalis, et qui est d'une sensibilité extrême) dans un tube recourbé (*fig.* 706), et plongeant dans chaque branche un fil de platine qui communique avec la pile : la liqueur qui environne le fil positif prend une teinte rouge, et celle qui baigne le fil négatif passe au vert. Ces effets sont appréciables avec une très-petite quantité de sels. De l'eau distillée parfaitement pure a même donné des signes d'acidité et d'alcalinité ; mais l'alcali provenait du verre, et l'acide, de l'oxygène de l'eau, qui, à l'état de gaz naissant, avait formé de l'acide nitrique avec l'azote de l'air en dissolution dans l'eau.

Quand l'acide et la base d'un sel sont difficilement décomposables, les deux éléments sont seulement séparés ; l'acide se rend au pôle positif, et la base au pôle négatif. Quand l'acide est facilement décomposable, le sel et l'acide sont décomposés :

Digitized by Google

l'oxygène se rend au pôle positif, et les bases du sel et de l'acide se rendent au pôle négatif. Quand l'oxyde est facilement décomposable, il est réduit : son oxygène et l'acide se rendent au pôle positif, et la base de l'oxyde se rend au pôle négatif. Enfin, quand l'acide et l'oxyde sont tous deux facilement réductibles, tous deux sont décomposés : les radicaux de l'acide et de l'oxyde se rendent au pôle négatif, et l'oxygène de l'acide et de l'oxyde passe au pôle positif.

Pour que ces phénomènes se produisent, il faut que le sel soit humide ou en dissolution dans l'eau ; dans ce dernier cas il y a en même temps beaucoup d'eau décomposée. Lorsqu'on soumet à l'action d'une pile un sel dont les éléments sont facilement décomposables, on peut à volonté obtenir la séparation de l'acide et de l'oxyde, ou la réduction de l'un et de l'autre, en faisant varier la force de la pile, ou seulement en augmentant ou en diminuant la distance des fils qui communiquent avec les pôles et qui plongent dans le liquide, parce que l'intensité du courant qui traverse un liquide varie avec l'espace qu'il est obligé de parcourir dans ce liquide.

Il y a cependant des corps qui ne sont point décomposés par la pile : tel est, par exemple, l'acide sulfurique très-concentré ; il est probable que cela tient au défaut de conductibilité de ces corps ; d'autres ne peuvent pas être décomposés, parce que s'ils l'étaient ils se reformeraient : tels sont, par exemple, les oxydes des métaux qui décomposent l'eau. Lorsque plusieurs éléments simples ou composés se réunissent simultanément aux pôles, il en résulte des produits secondaires et des phénomènes souvent compliqués, qu'il nous est impossible de décrire, car nous serions entraînés dans une dissertation qui est plus du domaine de la chimie que de la physique. Nous nous bornerons à donner quelques détails sur la réduction de la potasse et de la soude.

1124. Comme les bases des alcalis sont des métaux oxydables à l'air, et qui décomposent l'eau à la température ordinaire, on ne pouvait employer que la potasse sèche, et on n'obtenait que des atomes de métal qui se détruisaient presque aussitôt. Mais le docteur Seebeck découvrit un moyen très-simple de soustraire le métal à l'action de l'air. Ce procédé consiste à creuser dans un morceau d'hydrate alcalin solide une cavité que l'on remplit de mercure; on le place sur une plaque métallique que l'on fait communiquer avec le pôle positif, et l'on plonge le fil négatif dans le mercure : le métal alcalin réduit se combine avec le mercure, tandis que l'oxygène de l'alcali et de l'eau se rend au pôle positif. Pour que cette décomposition ait lieu, il faut employer une pile assez énergique, au moins de 50 paires de 2 à 3 pouces de côté. Lorsqu'on veut seulement reconnaître la présence du métal alcalin dans le mercure, il suffit de le jeter dans l'eau : il se dégage de l'hydrogène, et l'eau devient alcaline. Pour retirer le métal de l'amalgame, on prolonge l'opération, en renouvelant de temps en temps le mercure et jetant l'amalgame dans de l'huile de naphte; lorsqu'on a recueilli une suffisante quantité d'amalgame, on le distille avec l'huile de naphte dans une cornue de verre : l'huile et le mercure se volatilisent, et on trouve le métal alcalin pour résidu. MM. Gay-Lussac et Thénard ont ensuite découvert un procédé purement chimique beaucoup plus simple pour obtenir le potassium et le sodium.

1125. *Piles à zinc amalgamé.* Dans les piles formées avec du zinc ordinaire il y a beaucoup de zinc dissous par l'action directe de l'acide sur ce métal, pendant que le courant est établi ou qu'il est interrompu. Le zinc très-pur ne présente pas cet inconvénient, du moins au même degré. M. de Larive attribue cette différence aux métaux étrangers qui se trouvent dans le zinc du commerce, et forment avec lui de petits éléments voltaïques qui hâtent sa dissolution; les courants partiels qui en résultent diminuent aussi le courant que l'on produit en unissant le métal avec une lame de cuivre ou de platine. On évite ces inconvénients en employant du zinc qui a été recouvert d'une mince couche de mercure, en le frottant d'abord avec une dissolution

Digitized by Google

très-étendue de nitrate de mercure, et ensuite avec du mercure (Kemps et Sturgeon). Le zinc amalgamé isolé et plongé dans l'acide etendu ne décompose pas l'eau; mais au moment où il est mis en contact avec le cuivre ou le platine, de manière à former un élement, et que le circuit est fermé, il y a dissolution du zinc et production d'un courant, et l'oxydation s'arrête aussitôt que le circuit est interrompu. Les effets qu'on produit avec des piles formées de zinc amalgamé sont bien supérieurs à ceux qu'on obtient avec le zinc nu; avec des piles de 10 éléments on produit des décompositions qui exigeraient 500 ou 1000 couples ordinaires; et pour obtenir par la décomposition des composés la plupart des corps rares, il suffit de dépenser 4 à 5 fois leur poids de zinc; 3 parties 1/2 de zinc suffisent pour décomposer 1 once d'eau. Il est aussi très-avantageux de substituer aux plaques de cuivre des plaques d'argent ou de platine; on évite l'inconvénient que présentent les dissolutions de cuivre et la précipitation du cuivre sur le zinc, ce qui diminue sa force électro-motrice.

1126. *Transport des éléments séparés.* Toutes les décompositions chimiques présentent un phénomène très-remarquable, c'est que les éléments du corps décomposé ne se dégagent on ne se précipitent que sur les fils communiquant avec les pôles de la pile. Ce transport des éléments séparés paraît encore bien plus extraordinaire dans plusieurs expériences de MM. Berzélius et Hysinger. Si l'on met du sulfate de soude dans deux coupes séparées et communiquant par un fil d'amiante, en plongeant le fil positif dans l'une et le fil négatif dans l'autre, le sel est décomposé, et au bout de quelques heures tout l'acide se trouve dans une des coupes, et tout l'oxyde dans l'autre. Si l'on met dans les deux coupes des sels différents, les deux acides passent dans une coupe et les deux oxydes dans l'autre. Si on place entre deux coupes chargées, l'une de sel, et l'autre d'eau pure, une troisième coupe communiquant avec les deux autres par des fils d'amiante et renfermant une matière colorante facilement altérable par les acides et les alcalis, telle qu'une infusion de chou rouge, le sel renfermé dans la première coupe sera décomposé, son acide ou sa base se transportera dans la coupe où plonge l'autre fil, et le liquide intermédiaire à travers lequel un acide ou un alcali aura passé, suivant que l'on aura plongé dans la dissolution saline le fil négatif ou le fil positif, n'aura subi aucune altération. En général, les éléments séparés par des courants électriques peuvent traverser des dissolutions de corps ayant pour eux une grande affinité, sans que la combinaison ait lieu; il n'y a qu'une seule exception, c'est quand le liquide renferme une substance qui en se combinant avec l'élément entraîné peut former un corps insoluble : alors la combinaison s'effectue, à moins que le courant ne soit très-énergique.

1127. On a fait plusieurs hypothèses pour expliquer cette accumulation des éléments séparés par le courant électrique; toutes sont fondées sur ce que les éléments possèdent, ou reçoivent à l'instant de la décomposition, une électricité contraire : M. Biot suppose que tout le liquide placé entre les deux pôles se partage en deux parties douées d'un état électrique différent, et que les éléments du corps décomposé en dissolution dans le liquide, ayant des états électriques opposés, tendent à se porter dans la partie du liquide qui possède une électricité contraire à la leur. Grotthus admet une décomposition opérée à chaque pôle de la pile par les électricités contraires des éléments du corps; mais il admet en outre que toutes les molécules comprises entre les deux pôles éprouvent une décomposition et une recomposition successives; de sorte qu'il n'y a que les éléments opposés des molécules extrêmes qui, ne se recomposant pas, se dégagent ou se précipitent aux pôles. Par exemple, dans la décomposition de l'eau, la molécule qui est immédiatement en contact avec le pôle positif est décomposée, l'atome d'oxygène se dégage, et l'atome d'hydrogène s'empare de l'atome d'oxygène de la molécule suivante; l'hydrogène mis en liberté agit de la

Digitized by Google

même manière sur la molécule d'eau suivante, et ainsi de suite jusqu'au pôle négatif, où l'atome d'hydrogène se dégage. Enfin, dans la dernière hypothèse, émise par M. de Larive, ce physicien admet que le double courant électrique qui traverse le corps le décompose, et que chacun d'eux entraîne avec lui les molécules douées d'une électricité contraire, traverse avec elles la masse totale du liquide, et les dépose sur les conducteurs solides, à travers lesquels il ne peut pas les charrier. Cette dernière hypothèse paraît seule, du moins jusqu'ici, se concilier avec les faits observés; c'est ce que nous allons mettre en évidence.

Dans l'hypothèse de M. Biot, la décomposition du corps proviendrait uniquement de la tension; ce corps ne serait pas traversé par le courant, et il devrait être mauvais conducteur. Or les corps ne sont pas décomposés par une simple tension : car, quand on met en contact les fils avec les deux pôles contraires de deux piles différentes, il n'y a ni dégagement ni précipitation. En second lieu, le liquide est traversé par le courant : car, quand la décomposition a lieu, il n'existe plus de tension aux pôles, et l'aiguille aimantée, comme nous l'avons vu, constate que le double courant traverse le liquide. En troisième lieu, la décomposition se fait avec d'autant plus d'énergie que le liquide est meilleur conducteur. Enfin, dans cette hypothèse, les éléments séparés se trouveraient libres dans toute la masse liquide, ce qui n'a pas lieu, quoique ce fait semble résulter de l'expérience suivante : si dans l'appareil *fig.* 706 on décompose un sel en dissolution dans une eau colorée par une infusion de chou rouge, le liquide renfermé dans une des branches devient rouge, et l'autre vert; mais cet effet est le résultat des actions de l'acide et de l'alcali, qui se sont développés uniquement sur les pôles. M. de Larive l'a démontré en divisant un vase en trois parties par des parois en vessie : en introduisant la même dissolution saline colorée dans ces trois compartiments, et plongeant les fils dans les loges extrêmes, le liquide des loges extrêmes a seul été coloré.

L'hypothèse de Grotthus n'est admissible que pour un liquide homogène : car, pour qu'il se fasse de l'un à l'autre pôle des décompositions et recompositions successives, il faut nécessairement que ce soit le même corps qui se trouve entre les deux pôles. Or comment expliquer le passage d'un acide ou d'un alcali à travers un liquide qui n'est formé que d'eau pure? Ainsi cette hypothèse n'a aucune probabilité.

L'explication de M. de Larive n'est que l'expression des faits observés, car c'est aux doubles courants que sont dues les décompositions. Les éléments séparés éprouvent un véritable transport, puisqu'on les trouve là où le corps qui les a produits n'existe pas, et M. de Larive a reconnu, par une expérience directe, que les décompositions avaient lieu aux deux pôles. D'après cela, il faudrait supposer une espèce d'affinité entre les molécules et les courants électriques; mais cette conséquence ne présente rien d'inadmissible.

1128. *Influence des diaphragmes métalliques interposés dans la partie liquide du circuit.* Lorsqu'on interpose des diaphragmes métalliques dans une dissolution saline traversée par un courant électrique, de manière que le courant soit obligé de les traverser, il se forme des précipités contre chaque face de ces lames, et la force du courant diminue à mesure que le nombre des plaques augmente. M. de Larive, à la suite d'un grand nombre d'expériences, a obtenu les résultats suivants : 1° si l'on divise un vase allongé renfermant une dissolution saline en plusieurs compartiments, par des lames métalliques, les éléments de l'eau se dégagent sur chacune d'elles, l'oxygène d'un côté et l'hydrogène de l'autre; et la diminution d'intensité que le courant éprouve en traversant ces lames est d'autant plus petite que le courant est plus énergique, et que, pour chaque intensité, il provient d'une pile renfermant un

Digitized by Google

plus grand nombre de couples ; 2° de deux courants ayant la même intensité, l'un à la sortie de la pile, le second après avoir traversé plusieurs lames métalliques séparées par un liquide conducteur, le premier diminue beaucoup plus par l'interposition d'une lame métallique que le second ; 3° les métaux interposés diminuent d'autant moins l'énergie du courant que le métal est plus oxydable : ainsi, des lames de zinc non amalgamé ne produisent aucun effet, quel qu'en soit le nombre ; 4° l'étendue des surfaces des plaques et la longueur du trajet dans les liquides ne paraissent pas avoir d'influence ; 5° les courants éprouvent, en passant à travers des conducteurs liquides imparfaits, tels que l'eau pure, la même modification qu'en passant à travers des plaques métalliques : ils traversent des plaques métalliques et de nouveaux conducteurs imparfaits avec d'autant plus de facilité qu'ils en ont déjà traversé davantage. On voit, d'après cela, que, pour produire des décompositions chimiques, qui ont toujours lieu dans des liquides qui sont des conducteurs imparfaits, et les phénomènes de chaleur et de lumière qui se manifestent lorsqu'on fait passer les courants à travers des fils très-minces, et qui peuvent alors être assimilés aux corps imparfaitement conducteurs, il faut que les courants, en sortant des pôles, aient déjà traversé un grand nombre de plaques métalliques, afin qu'ils puissent facilement traverser le liquide ou le fil métallique, et par conséquent que les piles soient formées d'un grand nombre de couples ; mais, pour les phénomènes électro-dynamiques, comme les courants passent toujours à travers des conducteurs métalliques d'un diamètre suffisant, il faut que leur vitesse soit diminuée par le plus petit nombre possible d'intermittences de corps liquides, par conséquent que la pile ait un petit nombre de couples, et qu'ils soient de grande dimension.

1129. *Effets chimiques produits par des piles à petite tension.* Jusqu'ici nous n'avons considéré que les effets résultant de courants provenant de piles à un grand nombre d'éléments ; mais M. Becquerel est parvenu, à l'aide de courants d'une faible intensité, à produire des réductions et des combinaisons qui sont d'un grand intérêt, et parce qu'un grand nombre d'entre elles sont difficiles à produire par d'autres moyens, et parce qu'on obtient les corps en cristaux réguliers. On prend un tube recourbé en *U*, de 1 à 2 millimètres de diamètre, au fond duquel on place un tampon d'amiante ; dans l'une des branches on verse une dissolution de sulfate de cuivre mélangée avec une certaine quantité de deutoxyde du même métal qui va au fond, et dans l'autre une dissolution d'un hydrochlorate avec du même sel non dissous. Prenons d'abord du sel marin : on établit la communication par une lame de métal, que je suppose être de cuivre ; bientôt le bout qui est plongé dans la dissolution du sulfate se recouvre de cuivre à l'état métallique ; l'acide sulfurique mis à nu, qui ne va pas à l'autre pôle, se porte sur l'oxyde qui est au fond du tube, en dissout une partie, d'où résulte une nouvelle décomposition par l'action permanente de la petite pile ; de sorte qu'il s'opère de ce côté une suite non interrompue de décompositions et de recompositions. Dans l'autre branche du tube une partie de l'hydrochlorate de soude est décomposée ; l'acide hydrochlorique se porte sur le cuivre, qui s'est oxydé, comme étant à l'état positif, et donne naissance probablement à un oxychlorure qui se combine avec le chlorure de sodium : il se forme alors peu à peu sur la lame de cuivre des cristaux octaèdres.

Si on prend un tube fermé à une de ses extrémités de 2 à 3 millimètres de diamètre, renfermant du peroxyde de plomb, une dissolution d'hydrochlorate d'ammoniaque et une lame de plomb qui touche l'oxyde et la dissolution, il se forme en peu de jours sur la lame de plomb un grand nombre de cristaux de chlorure de plomb et d'ammoniaque.

Par des méthodes analogues, M. Becquerel est parvenu à former un grand nombre

Digitized by Google

de sels doubles et des cristaux de sels insolubles, par exemple des sulfates de chaux et de barite ayant la forme de ceux qu'on rencontre dans la nature : ces résultats, qui en promettent de plus importants encore, conduiront probablement à des notions précises sur la formation des cristaux naturels, qui jusqu'ici n'avaient pu être imités dans nos laboratoires. (Voyez les *Annales de chimie et de physique*, tom. XXXV et XLIII.)

M. Faraday, comme nous l'avons déjà vu (957), a obtenu des décompositions chimiques par l'écoulement lent de l'électricité de tension dans un corps isolé. Deux morceaux de papier, taillés en pointes, colorés, l'un avec du tournesol, l'autre avec du curcuma, et mouillés avec une dissolution de sulfate de potasse, furent placés sur une lame de verre en contact par une de leurs extrémités; les deux autres étaient voisines, celle de tournesol du conducteur d'une machine électrique, l'autre d'un conducteur communiquant avec la terre : la première pointe manifesta bientôt une réaction acide, l'autre une réaction alcaline; ainsi la pointe d'où se dégageait l'électricité négative devint acide, et par conséquent l'air environnant agissait comme le pôle positif d'une pile.

1130. *Lois des décompositions par les courants.* Lorsqu'un effet chimique produit par une pile ayant un certain nombre d'éléments peut l'être par un seul, un seul produit dans le même temps le même effet chimique qu'un nombre quelconque; la quantité de zinc dissout dans chaque élément est la même; et la quantité d'effet produit, de gaz dégagé ou de métal précipité, est sensiblement proportionnelle à la surface des éléments. Mais une batterie a un pouvoir chimique plus grand qu'un seul élément : elle peut vaincre des affinités qui résisteraient à un seul couple.

L'étendue des surfaces des couples, et la force de la dissolution interposée, n'augmentent point la faculté décomposante, c'est-à-dire que des corps qui ne seraient pas décomposés par une pile, ne le seraient pas davantage si on augmentait l'étendue de la surface des éléments et la concentration du liquide conducteur. Pour augmenter la puissance de l'action chimique d'une pile, il faut changer la nature du liquide ou augmenter le nombre des éléments.

Il ne faut pas prendre la décomposition de l'eau comme mesure de l'action chimique : car il y a des substances, telles que l'iodure de potassium et le chlorure d'argent fondu, qui peuvent être décomposées par des courants incapables de décomposer l'eau.

Un courant de même intensité, qui traverse un liquide renfermant des quantités variables d'acides ou de sels, décompose toujours la même quantité d'eau; les petites différences qu'on observe proviennent de l'inégalité des facultés dissolvantes des liquides pour l'hydrogène : ainsi, les sels ou les acides qu'on ajoute à l'eau n'agissent qu'en augmentant sa faculté conductrice.

Lorsqu'on place dans le même circuit des appareils pour décomposer l'eau dont les surfaces des plaques ou des fils ont des dimensions différentes, tous produisent dans le même temps la même quantité de gaz; mais cette quantité est plus petite que celle qui serait produite par un seul, attendu que l'intensité du courant diminue à mesure que le nombre des appareils augmente.

Lorsque le circuit, après avoir traversé un appareil propre à la décomposition de l'eau, se bifurque, et que les courants partiels se réunissent après avoir traversé chacun un appareil de décomposition, la somme des volumes des gaz recueillis dans ces derniers appareils est égale au volume du gaz recueilli dans le premier : ainsi, quand un courant se divise, la somme des puissances chimiques des courants partiels est égale à la puissance chimique du courant total.

En formant un élément avec une lame de platine et différents métaux amalgamés,

Digitized by Google

et faisant passer le courant à travers une dissolution de nitrate d'argent ou d'autres dissolutions métalliques, M. Matteucci a reconnu :

1° Qu'une quantité constante d'un métal quelconque dissoute par un acide de nature et de densité variables, et à une température quelconque, produit un courant dont l'action chimique est constante, c'est-à-dire qui précipite toujours le même poids d'un même métal en dissolution, quelle que soit la densité de cette dissolution; 2° Que, si le courant traverse une série de dissolutions métalliques, les poids des métaux réduits sont proportionnels à leurs équivalents chimiques ou aux poids de leurs atomes; ou, en d'autres termes, que le courant précipite le même nombre d'atomes de tous les métaux.

1131. *Polarités acquises par les lames métalliques qui ont servi aux décompositions chimiques.* Les corps solides qui ont servi de conducteur à l'électricité, lorsqu'une partie du circuit était formée par un corps liquide, acquièrent la propriété de donner lieu à un courant lorsqu'ils font partie d'un circuit renfermant un liquide : ainsi, lorsqu'on termine les deux pôles d'une pile par deux fils de platine, qui plongent dans une solution d'hydro-chlorate d'ammoniaque ou dans tout autre corps liquide qu'ils décomposent, si après quelques instants on les met en communication avec les extrémités d'un multiplicateur, et qu'on interpose entre eux un liquide conducteur, l'aiguille du multiplicateur indique l'existence d'un courant; ce courant est en sens contraire de celui qui existait quand les deux fils étaient en contact avec les deux pôles de la pile; un seul fil suffit pour l'établir. Le temps pendant lequel les fils sont restés dans le courant de la pile a une grande influence sur la faculté électromotrice qu'ils conservent, sur l'intensité de l'effet et sur sa durée; un fil conducteur laissé vingt ou trente minutes dans le courant, lavé et essuyé, possède encore après plusieurs jours la faculté d'établir un courant (M. de Larive). Le phénomène dont il est question peut être vérifié d'une manière très-simple : on prend deux vases de verre *A* et *B* (*fig.* 706 *A*), remplis d'eau acidulée, qui communiquent entre eux et avec les extrémités d'une pile par des fils de platine *a, b, c;* après que le circuit est resté fermé un certain temps, on supprime les fils *a* et *c,* on ferme le circuit par une mèche de coton, et les gaz continuent à se dégager aux extrémités du fil *b;* mais la nature du gaz qui se dégage à une même extrémité a changé.

Ce phénomène provient uniquement des acides et des alcalis qui se déposent sur les plaques ou les fils, et qui résistent aux lavages : car, si on plonge des fils de platine, l'un dans de l'eau contenant un millième d'acide nitrique, et l'autre dans de l'eau contenant un millième de son poids de potasse caustique, ces fils, lavés et essuyés, se comportent comme s'ils avaient servi à des décompositions chimiques. On voit aussi pourquoi le courant marche en sens contraire : car, quand un alcali est en contact avec un acide, le courant va de l'acide à l'alcali. Ces dernières observations, dues à M. Becquerel, expliquent parfaitement tous les effets des piles de Ritter (1036).

Lorsque des lames de platine ont été employées pour décomposer l'eau, et qu'elles restent en partie plongées dans le mélange des deux gaz, après qu'on a interrompu le circuit, le volume des gaz diminue rapidement par la recomposition de l'eau. M. Faraday a reconnu que cette propriété n'appartient qu'à la plaque qui a servi de pôle positif; que cette propriété diminue graduellement; qu'elle se conserve plus longtemps quand les plaques sont renfermées dans des vases clos, ou quand elles sont plongées dans des dissolutions acides ou alcalines, que quand elles sont exposées à l'air libre; et qu'enfin l'action de la chaleur des acides et des alcalis développe cette propriété dans les plaques qui n'ont point servi à des décompositions.

1132. *Anneaux colorés produits par l'action des courants électriques.* Léo-

Digitized by Google

pold Nobili est parvenu, au moyen d'un courant voltaïque, à produire sur des plaques de différents métaux des dessins réguliers colorés des teintes les plus vives. Le procédé employé par ce physicien consiste à faire, avec une matière quelconque, un rebord à la plaque, de manière à former un vase, que l'on remplit d'une dissolution saline ou d'un mélange de différentes dissolutions; la plaque communique directement à un des pôles de la pile, et on place dans le liquide un conducteur terminé par une pointe très-aiguë, mais environnée d'un corps isolant jusqu'à son extrémité, qui est placée à une demi-ligne de la plaque : quand le circuit est fermé, il se forme sur la plaque, en regard de la pointe, des cercles concentriques plus ou moins nombreux et diversement colorés; une pile de douze éléments d'un pouce carré suffit. Les teintes sont plus vives quand la plaque est positive que quand elle est négative, et quand on opère avec des dissolutions organiques. Nobili a décrit les effets qu'on obtient avec un grand nombre de dissolutions minérales, végétales et animales, sur différents métaux, et suivant la nature du pôle de la pile en contact avec la plaque. Nous rapporterons seulement une de ces expériences. Lorsqu'on met une dissolution d'acétate de cuivre et de nitre sur une plaque d'argent en contact avec le pôle négatif de la pile, le centre de la plaque, c'est-à-dire le point qui correspond à l'extrémité de la tige qui communique avec l'autre pôle, conserve le brillant métallique; on voit ensuite une série de cercles concentriques dans l'ordre suivant : deux petits cercles d'un vert peu chargé, un blanc, un rouge, un verdâtre, et une zone de cuivre d'un beau rouge de feu; cette zone est environnée d'un cercle azuré marqué de lignes rayonnantes, comme le serait un cercle gradué. Ensuite vient une seconde zone cuivrée, plus large que la première, mais également brillante, entourée d'un cercle d'un beau vert, qui termine la figure. Ces couleurs sont dues à des dépôts d'oxydes ou de métaux en lames minces quand la plaque est négative, et probablement à une altération du métal par les acides quand la plaque est positive; quand le liquide renferme des matières organiques, les anneaux résultent probablement du dépôt des corps séparés par le courant. Lorsqu'on produit simultanément les deux systèmes d'anneaux en plongeant dans le liquide deux pointes communiquant avec les extrémités de la pile, les anneaux sont aplatis dans les parties voisines; lorsque le courant arrive à la fois par les deux pointes, et que la plaque est en communication avec l'autre pôle, les anneaux se rapprochent dans les parties voisines : ces déformations n'ont point lieu quand on place une lame de verre sur la plaque, de manière à isoler les deux parties du liquide dans lesquelles plongent les pointes. Ces effets proviennent, sans aucun doute, des actions répulsives et attractives des courants coniques qui partent des pointes et viennent s'étaler sur les plaques. (*Annales de chimie et de physique*, t. 34, p. 280, 419). Plus tard, Nobili est parvenu à donner à ces bandes irisées tous les contours possibles, et à former sur les métaux des dessins très-variés et très-jolis; mais il n'a point fait connaître le procédé qu'il employait.

Priestley avait obtenu des anneaux colorés sur des plaques métalliques par des décharges électriques. En plaçant une pointe métallique à une demi-ligne de distance d'une lame, trente à quarante décharges d'une batterie de quatorze pieds carrés de surface produisent sur la lame des cercles concentriques de deux à trois lignes de diamètre. Ces anneaux ne changent pas d'aspect en intervertissant le sens du courant, et c'est le contraire dans les anneaux de Nobili. Les anneaux observés par Priestley, bien caractérisés sur le cuivre et l'acier, très-faibles sur les autres métaux, résultent probablement d'une oxydation de la plaque par la chaleur dégagée.

1133. Le magnétisme exerce aussi sur les actions chimiques une influence remarquable, que nous ne devons pas passer sous silence. Si, après avoir recourbé un tube de verre en forme de *V*, on le remplit d'une teinture de chou rouge, et qu'on

Digitized by Google

plonge dans chaque branche une tige de fer, dont l'une communique avec le pôle austral et l'autre avec le pôle boréal d'un aimant, après un quart d'heure, la couleur de la teinture devient d'un beau rouge dans les deux branches ; cet effet n'est pas dû à l'altération spontanée du liquide, car ce liquide abandonné à lui-même passe au vert. Cette curieuse observation est due à M. l'abbé Rendu. Ritter avait déjà fait des expériences qui viennent à l'appui de celle qui précède; ce physicien avait remarqué qu'en plongeant dans de l'acide nitrique très-faible les extrémités d'un fil de fer aimanté, le pôle méridional était beaucoup plus fortement attaqué que le pôle septentrional. M. Muschamn, professeur à l'université de Christiania, a observé un phénomène de même nature, que nous allons rapporter. Après avoir mis au fond d'un tube courbé en *U* une certaine quantité de mercure, insuffisante pour fermer la communication des deux branches, il versa dans le tube une forte dissolution de nitrate d'argent; ce liquide se mit de niveau dans les deux tubes, et l'appareil fut abandonné à lui-même. Par hasard, le plan des deux branches du tube se trouva dans le plan du méridien magnétique, et l'on remarqua que l'argent précipité s'accumulait principalement dans la branche tournée vers le nord; l'expérience fut répétée, et donna plusieurs fois les mêmes résultats. En étendant du nitrate d'argent sur une lame de verre autour de laquelle on avait pratiqué des rebords avec une matière grasse, et au centre de laquelle on avait placé une pièce de zinc arrondie, le métal précipité s'étendit plus vers le nord que dans toute autre direction; et, en plaçant le pôle sud d'un aimant dans le voisinage de la plaque, à deux pouces de distance, l'argent précipité se porta vers ce pôle avec beaucoup de rapidité, et la précipitation se fit dans un temps quatre fois moins long que quand l'aimant était éloigné.

§ VII. *Effets produits par les courants sur les corps organisés.*

1134. En parlant de la pile de Volta, il a été question des contractions qu'on éprouve lorsqu'on met les deux mains en contact avec les pôles d'une pile, directement ou par l'intermédiaire de corps plus ou moins bons conducteurs; mais il nous reste beaucoup de détails à donner sur la nature de ces effets, et sur ceux qu'on produit dans les cadavres récents et dans les végétaux.

Lorsqu'on touche les extrémités d'une pile avec les mains préalablement mouillées, on éprouve une commotion qui s'étend jusqu'au poignet ou au coude, suivant l'intensité de la pile; les effets sont plus marqués lorsqu'on tient avec les mains mouillées de gros cylindres métalliques, communiquant métalliquement avec les plaques polaires. On peut graduer à volonté la commotion en embrassant un nombre croissant d'éléments. Lorsque plusieurs personnes se tiennent par les mains de manière à former une chaîne continue dont les deux extrémités sont en contact avec les pôles de la pile, toutes éprouvent la même commotion; mais l'effet diminue rapidement avec le nombre des personnes interposées dans le circuit. Ces effets dépendent surtout du nombre des éléments de la pile, et beaucoup moins de leur étendue : car une pile en hélice, composée de douze paires de cinquante pieds carrés de surface, ne donne que de très-faibles commotions, tandis qu'une pile de cinquante couples d'un pouce carré de surface donne des commotions très-vives. Tant que la pile n'a qu'une centaine d'éléments qui n'excèdent pas quatre pouces carrés, la commotion peut être reçue sans danger; mais il n'en serait pas de même si le nombre des éléments et l'étendue de leur surface étaient beaucoup plus considérables.

Les commotions ont lieu à l'instant où l'on ferme et où l'on ouvre le circuit; dans l'intervalle on éprouve une sensation continue, dont il est impossible de définir la nature.

Digitized by Google

1135. Les cadavres de l'homme et des animaux, peu de temps après leur mort, et surtout ceux des animaux à sang froid, éprouvent par les courants électriques des contractions qui reproduisent tous les mouvements de la vie. Les limites dans lesquelles nous devons nous renfermer ne nous permettent pas d'exposer les nombreuses expériences qui ont été faites sur ce sujet; nous nous bornerons à rapporter quelques-uns des résultats les plus remarquables.

1136. Les contractions que les courants produisent dans les corps organisés peuvent se produire également par l'électricité de tension, ou par celle qui résulte soit de la chaleur, soit de certaines actions chimiques; ces contractions ne paraissent se manifester que par les nerfs. Les nerfs, comme on sait, partent du cerveau et de la moelle épinière, se ramifient dans toutes les parties du corps, et viennent s'épanouir sous l'épiderme. Lorsqu'un nerf est coupé, et qu'on l'irrite au-dessous de la section, le muscle correspondant se contracte, mais l'animal n'éprouve aucune sensation; et, si on l'irrite au-dessus, l'inverse est produit, et il n'y a point de contraction dans le muscle supérieur : ainsi l'influence nerveuse ne remonte pas pour le mouvement comme pour le sentiment. Les contractions ont lieu en faisant passer le courant entre deux points du nerf, quelque rapprochés qu'ils soient, ou, entre un nerf et un muscle; elles se manifestent à l'instant où le circuit est fermé et où il est ouvert.

1137. Pour préparer une grenouille destinée aux expériences galvaniques, on coupe avec des ciseaux la colonne vertébrale au-dessous des pattes de devant; en retournant la peau, on obtient de suite les cuisses écorchées surmontées d'une partie de la colonne vertébrale, ensuite on enlève les chairs de manière qu'il ne reste que les nerfs lombaires. Si on place la grenouille ainsi préparée à peu de distance d'une machine électrique en mouvement, et qu'on touche les nerfs avec un corps conducteur, à chaque fois qu'on tire une étincelle de la machine, les muscles sont fortement agités par l'effet du choc en retour : c'est la première observation de Galvani. En établissant la communication entre les nerfs lombaires et les cuisses par un arc composé de deux métaux, les muscles des cuisses éprouvent de vives agitations, qui cessent aussitôt que le courant est établi, et se reproduisent quand on interrompt le circuit. Lorsque la grenouille a été promptement préparée, et qu'elle était très-vive, on obtient des contractions très-prononcées en mettant directement les nerfs en contact avec les muscles. Lorsqu'un courant a passé quelque temps à travers une grenouille, elle ne se contracte plus quand on ouvre et qu'on ferme le circuit : l'affaiblissement de la sensibilité est d'autant plus considérable que le courant est plus fort. En changeant la direction du courant, l'excitabilité reparaît; le repos produit, en partie seulement, l'effet d'un courant opposé : mais après une heure et souvent moins, l'irritabilité a disparu sans retour. Les contractions qui se manifestent à l'instant de la rupture du circuit paraissent dues à un courant en retour. Un courant direct dans le sens des ramifications nerveuses produit beaucoup plus d'effet que le courant contraire. En opérant successivement sur le même individu, Nobili a reconnu que, quand le courant était direct, l'excitation, en ouvrant le circuit, était toujours plus faible qu'en le fermant, et que le contraire avait lieu quand le courant cheminait en sens contraire. La différence était croissante avec le nombre des expériences : après un certain nombre, dans le premier cas on n'obtient rien en ouvrant le circuit, et dans le second, en le fermant; cependant ces faits présentent souvent des anomalies.

1138. Par le même mode d'excitation on est parvenu à produire sur plusieurs espèces d'animaux des phénomènes extrêmement remarquables; nous en rapporterons quelques-uns. Une linotte était près d'expirer; ses yeux étaient fermés, et elle ne pouvait plus se tenir sur ses pattes; M. de Humbolt lui plaça une petite lame de

Digitized by Google

zinc dans le bec et une lame d'argent dans le rectum; la communication fut établie par une tige de fer : à l'instant l'oiseau rouvrit les yeux, se releva sur ses pattes, battit des ailes, respira six à huit minutes, et expira ensuite. La tête d'un bœuf récemment tué étant placée sur une table, on établit la communication d'une des oreilles aux naseaux : les yeux s'ouvrirent, les oreilles et la langue s'agitèrent (Galvani). En établissant la communication de la moelle épinière aux naseaux, les paupières s'ouvrirent complétement, et les yeux roulèrent dans leur orbite comme dans la plus violente fureur (Aldini). Une cigale qui venait d'être tuée, placée dans le circuit d'une pile, manifesta le bruit qui lui est propre.

Les expériences du docteur Ure sur le corps d'un pendu, immédiatement après l'exécution, avec une pile de 270 paires de 4 pouces de côté, chargée avec de l'eau acidulée, sont également très-remarquables. En établissant la communication entre la moelle épinière de la première vertèbre cervicale et le nerf sciatique, les muscles du corps éprouvèrent de violentes convulsions; en faisant mouvoir un des fils de la hanche au talon, la jambe, qui était pliée, fut lancée avec tant de force qu'elle faillit renverser un assistant, qui essayait en vain de s'opposer à son extension. Dans une autre expérience on parvint à produire les phénomènes de la respiration. Ayant établi la communication entre le talon et le nerf supra-orbital, tous les muscles de la face furent simultanément mis en mouvement, et exprimèrent d'une manière si effroyable la fureur, la rage, le désespoir, que plusieurs personnes furent obligées de quitter l'appartement.

1139. Dans les premières années qui ont suivi la découverte du galvanisme, on a fait beaucoup d'expériences sur les effets thérapeutiques des courants de la pile; on a essayé principalement de guérir par ce moyen la goutte, les rhumatismes, les paralysies, etc. On faisait passer les courants à travers l'organe affecté au moyen d'armatures métalliques placées de chaque côté. On a quelquefois obtenu, comme avec l'électricité de tension, des résultats satisfaisants. Il est bien certain que l'électricité joue un grand rôle dans les phénomènes de la vie; mais il faut que nos connaissances à cet égard soient bien plus avancées pour qu'on puisse avoir une marche assurée dans l'application de l'électricité aux différents cas pathologiques.

1140. Les plantes sont irritables aussi par les courants électriques, mais incomparablement moins que les animaux. Giulo, avec une pile de 50 paires, est parvenu à produire des mouvements dans la *mimosa sensitiva*, la *mimosa pudica* et la *mimosa asperata*. On a fait aussi beaucoup d'expériences pour reconnaître si l'électricité de tension favorisait la végétation. Les uns ont trouvé que l'influence était nulle; d'autres que l'électricité favorisait la végétation, et l'électricité négative plus que la positive. Les considérations théoriques que nous allons rapporter viennent à l'appui de ces dernières expériences. Les graines, quand elles germent, les bourgeons, les feuilles et les racines, jouissent de la propriété d'expulser un acide qui paraît être de l'acide acétique; c'est probablement par cette raison que les acides nuisent à la végétation, et que les alcalis la favorisent, et pourquoi une plante placée au pôle négatif d'une pile végète avec plus d'activité. Il est probable que l'écoulement continuel de l'électricité négative de la terre par les aspérités des plantes favorise la végétation en facilitant leurs sécrétions acides.

Les courants d'une grande puissance désorganisent les matières végétales. Une pile de 150 paires agissant pendant 5 jours sur une feuille de laurier, elle devint brune et desséchée; la matière colorante verte, la résine, l'alcali et la chaux furent transportés au pôle négatif et l'acide hydro-cyanique au pôle positif (Davy). Les courants agissent dans le même sens sur toutes les autres substances végétales.

Après avoir examiné les différentes classes d'effets produits par les courants, nous

Digitized by Google

allons étudier les différentes causes qui produisent les courants et les propriétés particulières qu'ils présentent suivant leurs différentes origines.

§ VIII. *Courants produits par l'influence d'autres courants ou des aimants (courants d'induction).*

Les phénomènes remarquables que nous allons décrire ont été découverts par M. Faraday.

1141. *Courants produits par l'influence d'autres courants.* Supposons que l'on ait enroulé sur un cylindre de bois deux fils de cuivre recouverts de soie, de manière que les différentes couches d'un même fil alternent avec celles de l'autre, afin que les différentes parties d'un même fil soient les plus voisines possibles de celles de l'autre. En mettant les extrémités d'un des fils en communication avec une pile renfermant un grand nombre d'éléments, et celles de l'autre en contact avec les extrémités du fil d'un multiplicateur très-sensible, on remarque qu'à l'instant de la fermeture du circuit, le second fil est traversé par un courant dirigé en sens contraire du premier, et qui ne paraît avoir qu'une très-courte durée, car l'aiguille du multiplicateur revient après quelques oscillations au point de départ; quand on interrompt le circuit, l'aiguille est encore déviée, mais le sens de sa déviation indique que le courant qui parcourt le fil est dans le même sens que celui qui était établi d'une manière permanente dans l'autre. Dans les expériences de M. Faraday, chaque fil avait 203 pieds de longueur et 1/20 de pouce de diamètre, et la pile renfermait 100 éléments disposés à la méthode de Wollaston, ayant chacun 4 pouces carrés; une pile de 10 éléments ne produisait aucun effet.

Lorsqu'au lieu de faire communiquer les extrémités du deuxième fil avec un rhéomètre, on le met en contact avec les extrémités d'un fil contourné en hélice et dont l'axe est occupé par une aiguille d'acier, celle-ci se trouve aimantée après que le circuit a été fermé; si on la retire avant d'interrompre le circuit, elle conserve son aimantation; mais si on la retire après, elle se trouve dans l'état primitif, attendu que le second courant induit détruit l'effet du premier.

M. Faraday a reconnu que le courant induit qui se produit à l'instant où l'on ferme le circuit est plus puissant que celui qui résulte de l'ouverture.

1142. *Courants produits par l'influence des aimants.* Supposons qu'on enroule sur un cylindre de carton, d'un pouce de diamètre environ, deux fils de cuivre recouverts de soie de 100 pieds de long; en mettant les extrémités de l'un d'eux en contact avec une pile, et l'autre avec un rhéomètre, il faut une pile très-puissante pour produire un courant sensible dans le second fil; mais si le cylindre renferme une barre de fer doux ayant un diamètre peu différent de celui du cylindre, la déviation de l'aiguille du rhéomètre est très-grande quand on ferme ou qu'on ouvre le circuit, et le courant induit est dirigé, dans le premier cas, en sens contraire, et, dans le second cas, dans le même sens que le courant qui traverse l'autre fil. Dans cette expérience c'est bien le magnétisme du barreau qui produit l'induction, car on obtient le même effet en supprimant la pile et aimantant le barreau de fer en approchant des deux côtés les pôles opposés de deux barreaux aimantés. Les barres d'acier produisent moins d'effet que celles de fer doux, et d'autant moins qu'elles sont plus fortement trempées; leur état magnétique permanent est sans influence.

Si, le tube de carton étant recouvert d'un seul fil, communiquant avec un rhéomètre, on introduit un aimant dans le cylindre, on obtient encore une déviation; mais elle est trois ou quatre fois plus grande quand on porte rapidement le milieu de l'aimant dans le tube que quand on y porte seulement une de ses extrémités.

Digitized by Google

1143. Les courants d'induction par les aimants, comme les courants hydro-électriques, ont une tension assez grande pour traverser les liquides conducteurs. On doit à M. Peltier des expériences nombreuses d'où résulte que la longueur du fil soumis à l'induction n'a point d'influence quand le rhéomètre est à un seul tour, et que cette influence augmente avec le nombre des tours de cet instrument. Ainsi, il paraît que la longueur du fil agit de la même manière que le nombre des éléments dans les piles, qui donne au courant la facilité de vaincre de plus grandes résistances. Quant à l'influence de la section du fil soumis à l'induction, elle n'existe au contraire que pour les rhéomètres à un petit nombre de tours, et elle est d'autant plus grande que le fil du multiplicateur a aussi un plus grand diamètre. Ce dernier résultat est tout à fait analogue à l'influence de la grandeur des éléments dans les piles.

D'après M. Christie, dans les mêmes circonstances, les courants d'induction ont des intensités proportionnelles aux pouvoirs conducteurs des métaux dont sont formés les fils dans lesquels les courants induits sont produits.

1144. *Machine magnéto-électrique.* Imaginons qu'un aimant puissant courbé en fer à cheval, soit fixé à un axe horizontal (*fig.* 707) auquel on puisse imprimer à l'aide d'une manivelle une rotation plus ou moins rapide, et qu'à une petite distance des extrémités de l'aimant se trouvent deux gros cylindres de fer doux, sur lesquels on a enroulé en sens contraire un même fil de cuivre recouvert de soie, dont les extrémités sont en m et en n : par la rotation de l'aimant chacune des deux masses de fer doux sera alternativement aimantée en sens contraire, et il se développera, au commencement et à la fin du passage de l'aimant devant chacune de ces masses, des courants d'induction dans le fil, courants qui seront en sens contraires, puisque les pôles sont de nature contraire, mais qui parcourront le fil dans le même sens, si le fil est tourné en sens contraire autour de chacun d'eux. Mais les courants seront en sens contraire dans le fil quand les pôles de l'aimant s'approchent et s'éloignent. Si on tient avec les mains préalablement mouillées les extrémités m et n du fil, on éprouve par la rotation de l'aimant des commotions qui se succèdent avec une rapidité qui croît avec celle de la rotation, et qu'on ne pourrait pas supporter impunément pendant quelques minutes. L'effet est beaucoup augmenté si on soude aux extrémités m et n des cylindres métalliques que l'on tient avec les mains mouillées, parce qu'alors la communication est bien mieux établie.

Si on soude aux extrémités m et n deux fils de platine, et si on les plonge dans de l'eau acidulée, l'eau est décomposée; mais les deux gaz se dégagent alternativement sur chaque fil, puisqu'à chaque rotation on a deux courants en sens contraires. On peut obtenir le dégagement du même gaz à l'extrémité du même fil, en disposant l'appareil de la manière suivante : au lieu de faire tourner l'aimant, on fait tourner les masses de fer doux, et au moyen de deux bascules on fait communiquer les extrémités m et n avec les extrémités m' et n' du reste du circuit qui contient les fils de platine, quand les barreaux de fer arrivent vers les pôles de l'aimant, et les mêmes extrémités m et n avec n' et m' lorsqu'ils s'éloignent.

On doit à M. de Larive des observations extrêmement curieuses sur l'influence de la vitesse de rotation dans les différents effets produits par les courants magnéto-électriques.

1145. Si on intercale dans le circuit un thermomètre métallique de Breguet (*fig.* 439), en faisant communiquer la partie supérieure de l'hélice avec une des extrémités du fil conducteur, et faisant plonger une aiguille verticale fixée à la partie inférieure de l'hélice dans un petit vase plein de mercure et en communication avec l'autre extrémité du conducteur, cet instrument indique une élévation de température qui augmente avec la rapidité de la succession des courants. Lorsque la vitesse de

Digitized by Google

rotation varie de manière que le nombre des courants alternatifs produits par seconde soit 2, 10, 20 ou 40°, les températures correspondantes du thermomètre sont 7° 55°, 100° et 133°; avec une plus grande vitesse on parvient à rougir un fil de platine.

1146. Les effets chimiques sont soumis à la même influence : la quantité du corps décomposé augmente avec la vitesse de rotation, mais seulement jusqu'à une certaine limite au delà de laquelle elle diminue. Mais ce qu'il y a de remarquable, c'est que le même nombre de courants produit d'autant plus d'effet que les courants se succèdent plus rapidement. Ainsi, quand les courants se succèdent de manière qu'il s'en produise 14, 28, 42, 48, 52 par seconde, il faut 1050, 462, 442, 400, 494 courants pour produire la même quantité de gaz.

Il résulte de là que l'influence de la vitesse de rotation ne consiste pas seulement à produire un plus grand nombre de courants dans le même temps, mais à donner une plus grande intensité à chacun d'eux.

1147. La diminution d'intensité qu'éprouvent les courants magnéto-électriques à travers des conducteurs métalliques ou liquides quand on augmente la longueur du conducteur est beaucoup plus grande que pour toutes les autres espèces de courants. Mais, chose très-remarquable, un fil d'un mètre de longueur composé de deux bouts égaux, l'un de fer, l'autre de cuivre, conduit bien moins qu'un fil de même longueur composé de 4 et même de 8 bouts de fer et de cuivre; et de l'eau acidulée conduit aussi bien quand elle est interrompue par des diaphragmes métalliques que quand elle est continue.

1148. Lorsqu'on intercale dans le circuit des vases renfermant le même liquide acidulé, communiquant entre eux par des fils de platine ou des lames du même métal, et un thermomètre métallique, le dégagement des gaz est beaucoup plus grand sur les fils que sur les lames; et si on enfonce progressivement les lames, la quantité de gaz qui se dégage sur les fils augmente, celle qui se dégage sur les plaques diminue, et la température indiquée par le thermomètre métallique augmente; enfin il arrive un point où le dégagement cesse sur les lames. A cet instant le thermomètre est parvenu à son maximum, ainsi que la quantité de gaz dégagée sur les fils: car, en enfonçant davantage les lames, la chaleur et la quantité de gaz dégagée sur les fils restent constantes. Il semblerait d'après cela que l'action chimique proviendrait de la résistance que le courant éprouve; on expliquerait l'absence de cette circonstance dans les courants hydro-électriques par la grande quantité d'électricité dégagée, qui ne peut que rarement s'écouler par les conducteurs qui réunissent les extrémités de la pile.

1149. Si on intercale dans le circuit un vase plein d'eau acidulée et un fil métallique, de manière que le courant soit obligé de se diviser en deux parties, dont l'une suit l'eau et l'autre le fil, pour se réunir au delà et traverser un thermomètre métallique, en augmentant progressivement la longueur du fil, le thermomètre marque des températures qui augmentent et diminuent alternativement. Suivant M. de Larive, ces phénomènes semblent indiquer que les courants se propagent par ondulations, et qu'il se produit des interférences qui augmentent ou diminuent l'intensité du courant suivant la différence de marche. Mais ils me paraissent s'expliquer par le seul fait de la propagation non instantanée des courants: car, si la différence de temps de la propagation dans les deux conducteurs est égale à l'intervalle qui sépare l'émission des deux courants consécutifs opposés, il est évident qu'ils se détruiront au delà, et que, si la différence est égale à deux fois cet intervalle, les courants seront dans le même sens. Ces expériences pourraient conduire à la détermination de la vitesse de propagation des courants dans les corps conducteurs.

1150. Lorsqu'on décompose de l'eau acidulée par un courant magnéto-électrique

Digitized by Google

à l'aide de fils de platine, le dégagement du gaz diminue graduellement et finit par disparaître complétement, et en même temps la température indiquée par un thermomètre métallique placé dans le circuit augmente et devient stationnaire quand le dégagement a cessé. A cet instant, les fils de platine sont recouverts d'une matière noire qui n'est autre chose que du platine très-divisé; l'or et le palladium présentent les mêmes phénomènes, ainsi que les métaux attaquables par les dissolutions conductrices, tels que le cuivre, l'argent et le plomb. M. de Larive n'a pas pu reconnaître si l'absence du dégagement de gaz résultait de ce qu'il n'y avait point d'eau décomposée, ou de ce que les gaz, arrivant presque en même temps sur les surfaces métalliques, se recomposent par l'influence de ces surfaces. Il me semble que l'on pourrait expliquer ce fait par le pouvoir absorbant des corps très-divisés : les gaz seraient absorbés à mesure de leur formation et se combineraient. Quant à la cause qui produit cette couche métallique très-divisée, M. de Larive pense qu'elle réside dans l'ébranlement que les métaux éprouvent par les courants dirigés en sens contraire qui se succèdent avec une grande rapidité. Plusieurs circonstances tendent à confirmer cette conjecture : 1° ce sont les métaux qui ont le plus de tenacité qui résistent le plus à cette désagrégation; 2° les ébranlements sont très-visibles quand on emploie du mercure pour conduire le courant dans un liquide, les mouvements vibratoires qu'il éprouve sont beaucoup plus grands que quand il sert de pôle négatif à un courant voltaïque. On voit aussi autour des fils métalliques, surtout autour des fils d'argent, quand ils plongent dans un liquide où ils conduisent les courants magnéto-électriques, une suite de vibrations qui partent de la surface immergée et se propagent dans le liquide. Les fils d'or et d'argent ne présentent ce phénomène que lorsqu'ils sont recouverts de leur couche divisée et bien épaisse; il faut aussi, pour qu'ils soient visibles, que les courants ne se succèdent pas avec beaucoup de rapidité.

1151. *Courants d'induction qui se forment dans le fil que traverse le courant.* On doit à M. Jenkins une expérience très-importante, qui démontre qu'il se développe par induction des courants dans le fil même qui sert à transmettre le courant. Lorsque deux fils métalliques communiquent avec les deux éléments d'un couple voltaïque et qu'on les touche avec les mains mouillées, on n'éprouve aucune secousse quand on ferme ou qu'on ouvre le circuit; mais si l'un des deux fils est très-long, recouvert de soie et enroulé autour d'un morceau de fer doux, en tenant avec les mains mouillées les deux extrémités des fils en contact métallique, on éprouve une secousse quand on ouvre le circuit, et il se produit une brillante étincelle au point de rupture.

1152. D'après les expériences de M. Faraday, si on fait passer un courant à travers un fil très-long, 132 pieds, et placé en ligne droite, il se produit à l'instant de la rupture du circuit une faible étincelle, et la commotion est presque insensible; avec un fil court on n'obtient rien. Mais si le long fil est tourné en spirale sur un cylindre de carton, on obtient une étincelle et une commotion, et ces effets sont beaucoup plus grands quand on place une barre de fer doux dans le cylindre de carton.

1153. Ces phénomènes paraissent dus à un courant d'induction qui se produit dans le conducteur lui-même, car toutes les circonstances qui favorisent l'induction favorisent la production du courant dont il s'agit. Ce courant est aussi dans le sens du courant principal comme les courants induits ordinaires; mais il ne se forme dans le fil qu'autant qu'il ne peut pas se former ailleurs : car, si on enroule sur un carton deux fils recouverts de soie, d'une longueur suffisante, en faisant passer le courant par un des fils et mettant en communication métallique les extrémités de l'autre, le premier ne donne ni étincelle ni commotion quand on interrompt le circuit; mais, si les extrémités du second fil ne sont pas en communication, il se

Digitized by Google

produit dans le premier un courant énergique à l'instant de la rupture. Lorsqu'on fait passer un courant à travers un fil rectiligne très-long, nous avons dit qu'il se produisait une faible étincelle à l'instant de la rupture du circuit; M. Faraday a reconnu que, si le fil était plié de manière à former deux parties égales et parallèles, l'étincelle disparaissait, probablement parce que les influences réciproques de ces deux parties se détruisent. M. Faraday pense qu'il se forme aussi un courant à l'instant où l'on ferme le circuit; mais il est en sens contraire du courant principal.

1154. Les secousses qui se produisent au moyen d'une pile à un petit nombre d'éléments lorsque le conducteur est tourné en hélice autour d'un barreau de fer doux peuvent être multipliées et rapprochées au moyen d'une disposition imaginée par M. Masson. Une roue dentée métallique, fixée à un axe aussi métallique, tourne, dans deux coussinets amalgamés, à l'aide d'une manivelle; un des coussinets est en communication avec un des pôles de la pile, et l'autre pôle est en contact avec un fil qui, après s'être enroulé autour du cylindre de fer, vient communiquer avec une plaque métallique fixe, que les dents de la roue viennent frapper successivement; par cette disposition, en tournant la roue, on ferme le circuit à chaque contact de la plaque avec une dent, et il se trouve rompu dans l'intervalle qui sépare deux contacts consécutifs. En mettant les mains humides en contact avec les parties du conducteur situées de chaque côté du point où se fait la fermeture et la rupture du circuit, on éprouve une série très-vive de commotions, et quand la vitesse est très-grande on éprouve une contraction douloureuse, dont l'effet, indépendant de la volonté, est de ne pas permettre à l'expérimentateur d'abandonner les conducteurs métalliques qu'il a saisis; au contraire les mains serrent ces conducteurs avec plus de force. Une pile d'un petit nombre d'éléments peut tuer un chat en 4 ou 5 minutes. Les muscles de l'animal mort sont dans un état de roideur extrême, que Nobili avait déjà observé en petit sur les muscles des grenouilles tourmentées par de nombreuses décharges. Un fait très-remarquable, observé par M. Masson, c'est que, si la vitesse de la roue, déjà très-grande, augmente encore progressivement, la sensation diminue et finit par disparaître.

1155. *Induction provenant de l'action de la terre.* Si on prend un fil contourné en hélice autour d'un cylindre de carton, et dont les deux extrémités sont en contact avec un rhéomètre multiplicateur très-sensible, en plaçant l'hélice dans la direction de l'aiguille d'inclinaison et y introduisant un cylindre de fer doux sans polarité magnétique, l'aiguille du multiplicateur est aussitôt déviée. Si on soude aux deux extrémités du fil d'un multiplicateur un long fil de cuivre recourbé, en faisant passer ce fil de droite à gauche ou de gauche à droite du multiplicateur, l'aiguille est déviée, et on obtient le même effet que si le fil se déplaçait par rapport à un aimant dirigé suivant l'aiguille d'inclinaison (M. Faraday).

1156. *Courants produits dans des plaques métalliques mobiles par l'influence des aimants et de la terre.* Une plaque de cuivre circulaire verticale est mise en mouvement autour de son axe. L'axe de rotation, dans une certaine étendue, est couvert d'amalgame, ainsi que la circonférence du disque, et les deux extrémités du fil d'un multiplicateur sont en contact, l'une avec la partie de l'axe amalgamé, l'autre avec la circonférence du disque (*fig.* 708). Si on approche les pôles contraires de deux aimants de chaque côté du disque, en établissant le contact d'une des extrémités du multiplicateur avec la circonférence précisément entre les deux pôles, le mouvement de rotation du disque produit dans le multiplicateur une déviation qui indique un courant dirigé de la circonférence au centre, ou du centre à la circonférence, suivant le sens de la rotation. Quand le contact a lieu à la circonférence du disque, en avant des pôles ou au delà, la rotation ayant toujours lieu dans le même sens, les

Digitized by Google

courants ont toujours la même direction, jusqu'à une distance de 50° à 60° de chaque côté des pôles magnétiques; mais le courant va en diminuant à mesure que le point de contact s'éloigne des pôles, et à des distances égales de part et d'autre il a la même intensité. En élevant davantage le disque, de manière que les pôles en regard s'éloignent de la circonférence, les mêmes effets sont produits. Si on met les deux extrémités du fil conducteur en contact avec la circonférence, de manière que, l'un d'eux étant entre les deux pôles (*fig.* 709), l'autre soit à droite ou à gauche, on obtient dans les deux cas des courants opposés. Quand les deux points de contact sont symétriquement placés par rapport aux pôles, l'aiguille du multiplicateur est stationnaire. Ainsi la rotation du disque développe des courants dirigés suivant les rayons et la circonférence, et ces courants sont symétriquement placés par rapport au rayon qui passe entre les pôles.

La direction des courants dans le disque en mouvement donne une explication bien simple des phénomènes de rotation découverts par M. Arago (849). En effet, si l'aiguille était mobile et le disque en mouvement, on voit que chacun de ces courants tendrait à pousser l'aimant dans la même direction.

1157. MM. Nobili et Antinori ont cherché à déterminer d'une manière plus précise la direction des courants sur la surface des disques en mouvement. Ils ont employé la même méthode que M. Faraday, mais les extrémités du fil du multiplicateur étaient terminées par des pointes amalgamées, et pouvaient être appliquées sur les différents points de la surface du disque : ils ont ainsi trouvé la disposition des courants indiqués dans la figure 710. Or il est facile de voir, à l'inspection de la figure, que les courants placés en R et R' exercent des actions répulsives sur les courants les plus voisins qui circulent dans l'aimant, et que les courants placés en A et A' exercent au contraire une action attractive sur les courants les plus voisins. Quant à ceux qui sont compris dans la zone qui passe sous l'aimant, leur intensité doit aller en décroissant à mesure qu'ils s'approchent du milieu de l'aimant, puisque les courants sont de signe contraire entre l'aimant et la circonférence, et entre l'aimant et le centre, mais leurs effets sont encore dans le même sens, comme il est facile de le reconnaître. En effet, soit *abcd* (*fig.* 711) l'aimant, *mn* un courant plus voisin du point b que du point c, le courant sera dirigé comme l'indique la flèche; si on prend un point b' tel que $mb' = mb$, les actions du courant *mn* sur les parties *bm* et mb' se détruiront, et il restera une action dirigée dans le sens de celle des courants les plus voisins $a\ b$ et $b'c$, qui est répulsive; la même chose aurait évidemment lieu si le point m était plus voisin de c que de b, et pour les courants qui se trouvent de l'autre côté.

De cette disposition des courants résultent nécessairement les trois composantes de la force qui sollicite une aiguille soumise à l'influence d'un disque en mouvement (850). En effet, la première resulte de ce que les forces attractives résident dans les parties du disque qui s'éloignent, et les forces répulsives dans les parties du disque qui s'approchent de l'aimant; et comme MM. Nobili et Antinori ont reconnu que ces dernières envahissent le disque jusque sous l'aimant; de sorte qu'elles s'étendent au delà du rayon qui passe par le centre de l'aimant, alors elles l'emportent sur les forces attractives qui s'exercent de plus loin et plus obliquement : de là l'origine de la composante perpendiculaire au disque, et qui tend à éloigner le pôle du disque. Quant à la force dirigée suivant le rayon, il est facile de voir que, quand l'aimant est près de la circonférence, tous les points répulsifs étant d'un seul côté par rapport à la ligne passant par le centre de l'aimant et perpendiculaire au rayon du disque, la résultante des forces répulsives sera oblique au rayon, et donnera une composante dans cette direction qui agira du centre à la circonférence; mais, à mesure que l'ai-

Digitized by Google

mant se rapprochera du centre, les points répulsifs seront placés de chaque côté de la ligne perpendiculaire au rayon, la résultante se rapprochera de la normale au disque, et il existera une distance de l'aimant au centre pour laquelle la résultante sera exactement perpendiculaire au rayon; au delà, la composante parallèle au rayon s'inclinera en sens contraire, mais elle deviendra nulle de nouveau quand l'aimant sera au centre du disque.

Il est important de remarquer que, dans les expériences de M. Faraday comme dans celles de MM. Nobili et Antinori, on n'obtient que l'indication de certaines parties des courbes parcourues par les courants, courbes qui sont complétement inconnues, mais dont il faudrait connaître la forme et la position pour déterminer exactement l'effet produit sur l'aiguille, attendu que cet effet résulte de l'action totale des éléments de tous les courants.

1158. Il résulte évidemment des expériences de M. Faraday que, si un disque tournant était soumis à l'action de deux pôles magnétiques contraires, placés dans le plan de rotation et dans la direction d'un même diamètre, il se produirait des courants dirigés suivant les diamètres, et dont le sens dépendrait de celui de la rotation. Or, comme l'action de la terre peut être assimilée à celle de deux pôles magnétiques dirigés suivant la ligne d'inclinaison, on conçoit que, si on fait tourner un disque autour d'une ligne perpendiculaire à son plan, à la ligne d'inclinaison et dans le méridien magnétique, il devra se produire des courants dans le disque, qui pourront être observés en approchant de ses bords une aiguille aimantée astatique; c'est ce que M. Faraday a vérifié par des expériences multipliées. Mais, si on incline l'axe de rotation, l'effet produit diminue, et finit par disparaître complétement lorsque sa direction coïncide avec celle de l'inclinaison : car alors l'effet doit être le même que quand le pôle d'un aimant est au centre de rotation. Une autre conséquence très-importante, c'est que, si le disque était remplacé par un globe creux, les courants devraient être dirigés suivant les méridiens, puisque les courants sont toujours perpendiculaires à la direction du mouvement. M. Faraday a encore vérifié ce fait, et il a trouvé que les déviations d'une aiguille aimantée astatique étaient les mêmes que celles que M. Barlow avait trouvées par la rotation d'une bombe : ainsi ces derniers phénomènes sont, sans aucun doute, le résultat de l'action inductive de la terre.

§ IX. *Développement des courants électriques par la chaleur.*

1159. En 1821, le docteur Seebeck, professeur à Hall, découvrit dans la chaleur une nouvelle cause de production de l'électricité. L'appareil employé par ce physicien consistait en un circuit fermé composé de deux métaux différents : en maintenant les deux soudures à des températures différentes, un courant électrique parcourait le circuit. Depuis, M. Becquerel est parvenu à produire un courant dans un circuit formé d'un seul métal. Nous commencerons par exposer ces derniers phénomènes, comme les plus simples.

1160. *Courants développés dans un circuit formé d'un seul métal.* Soit *abc* (*fig.* 712) un circuit fermé composé d'un fil de platine dont les extrémités sont soudées aux deux bouts du fil d'un rhéomètre multiplicateur : si on élève la température d'une partie quelconque, il ne se manifeste aucun courant; mais, si l'on fait en *o* un nœud ou une petite spirale, et que l'on porte le foyer de chaleur à peu de distance en *F*, il se produit aussitôt un courant électrique dont la direction indique que l'électricité positive marche vers le point *o*. Un fil de palladium se comporte comme un fil de platine, un fil d'or ne produit point d'effet, un fil d'argent un effet très-faible, ainsi qu'un fil de cuivre. Ces courants paraissent provenir d'une différence dans la

Digitized by Google

propagation de la chaleur, occasionnée par la petite masse métallique placée en *o*. On peut aussi développer des courants thermo-électriques dans un fil continu de fer ou de cuivre, d'or ou de platine, d'un diamètre constant, lorsque ses différentes parties n'ont pas le même degré de trempe ou de recuit, probablement parce que ces différences en produisent dans la faculté conductrice pour la chaleur.

On peut produire les mêmes phénomènes avec un fil discontinu. Si on forme une spire à une des extrémités d'un fil, et qu'après l'avoir chauffée on la mette en contact avec l'autre bout, ou si on réunit les deux bouts par un crochet, en appliquant la chaleur d'un seul côté, il se produit un courant dont la direction indique que l'électricité positive passe du côté du fil qui s'échauffe le plus difficilement : ainsi le courant va du chaud au froid. Avec un fil de cuivre il n'y a de courants qu'autant que l'un des bouts du fil est oxydé, ou couvert d'une couche très-mince de mercure, d'or, d'étain ou d'argent. L'or et l'argent, quand ils ne sont pas purs, se comportent comme le cuivre ; les métaux oxydables, tels que l'antimoine, le fer et le zinc, présentent des effets inverses ; le courant va de la partie froide à la partie chaude ; le plomb et l'étain donnent des effets variables. Ces anomalies ne tiennent pas à une action chimique, car elles se produisent dans l'huile parfaitement privée d'air. Certains métaux en fils sans discontinuité et sans protubérances tels que le fer, donnent naissance à des courants lorsqu'une partie quelconque a été préalablement recuite, et qu'on applique la chaleur en un point quelconque. M. Seebeck a reconnu qu'il se produit également des courants dans des anneaux fondus de bismuth et d'antimoine quand on refroidit une moitié et qu'on élève la température de l'autre ; M. Sturgeon a reconnu dans les cadres de ces deux métaux que certains points chauffés produisaient des courants, les uns dans un sens, les autres dans un autre, et que les points neutres, ceux qui ne produisent point de courants, sont ceux où la matière a dû commencer à se refroidir. Ce même physicien a reconnu des courants dans des barreaux cylindriques et coniques de ces deux métaux : avec un cône d'antimoine fondu, les courants étaient dirigés de haut en bas ou de bas en haut, suivant qu'on refroidissait ou qu'on échauffait la base. Tous les métaux possèdent des propriétés thermo-électriques analogues, pourvu qu'ils soient en grandes masses. Il est probable que ces phénomènes proviennent du défaut d'homogénéité des masses relativement à leur état cristallin.

1161. *Courant produit dans un circuit formé de plusieurs métaux.* L'appareil employé par M. Seebeck se compose (*fig.* 713) d'un cylindre de bismuth ou d'antimoine *ab*, aux deux extrémités duquel on a soudé une lame de cuivre deux fois recourbée. La partie *cd* est environnée de soie afin que l'on puisse la tenir à la main. Ce circuit, dans son état naturel, n'a aucune action sur une aiguille aimantée ; mais, si l'on chauffe une des soudures *a* ou *b*, il s'établit un courant électrique dont on peut facilement constater l'existence et la direction en présentant un des côtés du rectangle à une aiguille aimantée ; ce courant va en s'affaiblissant jusqu'à ce que les deux soudures se retrouvent à la même température. Il suffit, pour produire ce phénomène, de présenter pendant quelques instants une des soudures à la flamme d'une bougie ou à un corps chaud quelconque, ou de la toucher avec la main. Si c'est la soudure *a* qui a été échauffée, le courant va dans le sens *bacd* ; et, si c'est la soudure *b* dont on a élevé la température, le courant va dans le sens *abdc*. Le même effet a lieu en refroidissant une des soudures ; en général le courant s'établit aussitôt que les deux soudures ne se trouvent pas à la même température.

On peut aussi se servir d'un rhéomètre multiplicateur à fil court, en mettant en communication avec ses extrémités deux fils de cuivre, dont les autres extrémités sont soudées à un cylindre de bismuth ou d'antimoine : la chaleur de la main est

Digitized by Google

suffisante pour produire une grande déviation. On peut aussi se contenter d'enrouler aux extrémités du fil du multiplicateur les extrémités d'un fil de fer : en appliquant les doigts à une des jonctions on obtient des déviations qui, pour les rhéomètres très-sensibles, peuvent s'élever jusqu'à 70° et même 80°.

1162. En formant des circuits avec différents métaux, on a pu les ranger dans l'ordre de leur propriété thermo-électrique. Dans les deux tableaux qui suivent, chaque métal est positif par rapport à celui qui précède, et négatif relativement à ceux qui suivent. Le premier est de M. Cumming; le second de M. Becquerel.

Bismuth, mercure, nickel, platine, palladium, cobalt, manganèse, argent, étain, plomb, rhodium, laiton, cuivre, or, zinc, charbon, plombagine, fer, arsenic, antimoine.

Bismuth, platine, plomb, étain, cuivre, or, argent, zinc, fer, antimoine.

1163. M. Becquerel a découvert plusieurs faits d'une haute importance que nous rapporterons.

1° L'effet produit est le même quand les métaux sont immédiatement en contact ou séparés par une soudure quelconque; et quand le métal intermédiaire a une étendue quelconque, l'effet est encore le même en chauffant une quelconque des extrémités. On démontre ce fait au moyen du circuit *fig.* 714, dans lequel le cuivre et le fer sont en contact au point *a*, et séparés aux points *b* et *c*, *d* et *e*, *f* et *g*, par des fils de platine, d'or ou d'étain : en portant successivement les soudures *a, b, c, d, e, f, g*, à 50°, les autres étant maintenues à 0°, on obtient la même déviation.

2° Lorsque les deux soudures d'un circuit fer et cuivre sont maintenues à différentes températures, l'intensité du courant est égale à la différence des intensités des deux courants qui seraient produits si une des deux soudures était à zéro, et non, comme on aurait pu le penser, à l'intensité du courant résultant de la différence des températures.

3° Dans un circuit fer et cuivre, l'une des soudures étant à zéro, et la température de l'autre croissant progressivement, l'intensité du courant ne croît pas proportionnellement à la température : à 300° l'accroissement est à peine sensible; au delà, l'intensité décroît, et change de signe au rouge sombre. Dans un circuit zinc et argent la déviation maximum a lieu à 120°; elle est nulle à 225°, et au delà elle change de signe. Dans un circuit zinc et or elle est nulle à 150°, et change de signe à une température plus élevée. Les circuits fer et cuivre de même longueur produisent toujours les mêmes effets, quels que soient le diamètre des fils et le mode de contact, c'est-à-dire qu'il y ait soudure ou réunion par une forte pression. Avec les circuits zinc et argent, zinc et or, on obtient des résultats différents, suivant le diamètre des fils et le mode de contact.

4° Pour des circuits fer et argent, fer et cuivre, cuivre et platine, argent et étain, cuivre et argent, les intensités des courants sont proportionnelles à la température d'une des soudures au moins jusqu'à 40°, l'autre étant à zéro. Cette propriété est importante, car on peut s'en servir pour graduer avec une grande facilité les rhéomètres multiplicateurs : il suffit pour cela de souder aux extrémités du fil de cuivre de l'instrument les extrémités d'un fil de fer, de plonger une des soudures dans de la glace fondante, et l'autre dans de l'eau à 40°, et d'observer les déviations correspondantes aux températures de l'eau pendant son refroidissement : on obtiendra les déviations correspondantes à des intensités représentées par la température de l'eau.

5° Enfin M. Becquerel est parvenu, à la suite des expériences que nous allons rapporter, à déterminer avec une grande probabilité les rapports des pouvoirs thermo-électriques des différents métaux.

Pour reconnaître les rapports d'intensité des courants thermo-électriques produits

Digitized by Google

par différents métaux, M. Becquerel soudait, bout à bout, des fils des métaux sur lesquels il voulait opérer ; les deux extrémités de cette chaîne étaient elles-mêmes soudées aux extrémités du fil du rhéomètre, et il élevait la température de la soudure où se trouvaient les deux métaux dont il voulait mesurer le pouvoir thermo-électrique. Par cette disposition la conductibilité de l'appareil restait constante et les résultats étaient comparables.

Voici le résultat des expériences ; une des soudures a été élevée à 20°, et toutes les autres ont été maintenues à 0°.

Désignation des soudures.		*Intensité du courant.*
+	—	
Fer	étain	31,24
+	—	
Cuivre	platine	8,55
+	—	
Fer	cuivre	27,96
+	—	
Argent	cuivre	2,00
+	—	
Fer	argent	26,20
+	—	
Fer	platine	36,07
+	—	
Cuivre	étain	3,50
+	—	
Zinc	cuivre	1,00
+	—	
Argent	or	0,50

A l'inspection de ce tableau, on voit que, pour une température donnée de 20°, chaque métal acquiert une puissance ou action thermo-électrique telle que l'intensité du courant électrique que l'on obtient par l'élévation de température d'une soudure est égale à la différence des quantités qui représentent chacune de ces actions. Par exemple, pour le fer et le cuivre, en désignant par P cette action ou cette puissance, on a P fer$-P$ cuivre$=27,96$ pour l'intensité du courant lorsqu'on élève la soudure fer cuivre à 20° ; de même pour le platine et le fer, P fer$-P$ platine$=36,07$. En retranchant la première de la seconde on a P cuivre $-$ P platine $= 8,11$: or, l'expérience donne 8,55, qui en diffère peu. Il est donc bien démontré que l'intensité d'un courant thermo-électrique est égale à la différence des actions thermo-électriques produites dans chaque métal par la même température. Alors, si on représente par x le pouvoir thermo-électrique du fer à 20°, on aura pour les autres pouvoirs thermo-électriques les valeurs suivantes :

P fer $= x$.
P argent $= x - 26,20$.
P or $= x - 26,70$.
P zinc $= x - 26,96$.
P cuivre $= x - 27,96$.
P étain $= x - 31,24$.
P platine $= x - 36,00$.

Dans cet arrangement ; chaque métal est positif par rapport à ceux qui le suivent, et négatif relativement à ceux qui précèdent.

Digitized by Google

On voit, d'après ce tableau, que les pouvoirs thermo-électriques de l'argent, de l'or, du zinc et du cuivre, sont à peu près égaux : or, parmi les différentes propriétés calorifiques de ces métaux, la seule qui présente les mêmes rapports, c'est la faculté rayonnante. Si cette conjecture se vérifiait, il faudrait admettre que dans le contact de deux métaux différents, le rayonnement de chaque surface est le même que dans l'air, et que la différence des pouvoirs rayonnants détermine le sens de l'intensité du courant. En admettant cette hypothèse, on pourrait déterminer la valeur de x par le rapport connu des facultés rayonnantes : par exemple, d'après Leslie, le rapport du rayonnement du fer et de l'or est 15 : 12. On aurait alors la proportion

$$x : x - 26{,}70 :: 15 : 12.$$

Les pouvoirs thermo-électriques des métaux seraient alors représentés par les nombres suivants :

Fer.	133,50
Argent.	107,30.
Or.	106,80.
Zinc.	106,54.
Cuivre.	105,54.
Étain.	102,26.
Platine.	97,50.

Ces nombres se rapportent à une conductibilité électrique déterminée et à une certaine température ; mais leur rapport est indépendant et de la température et de la conductibilité du circuit : car chacun d'eux varie proportionnellement à ces deux éléments, mais pour la température jusqu'à une certaine limite seulement.

M. Becquerel a reconnu que ces nombres sont aussi indépendants du plus ou moins de chaleur, et du refroidissement dans l'air de la partie des fils situés au dehors de la source de chaleur. Pour cela il fallait former un circuit de plusieurs fils alternatifs de fer et de cuivre n'ayant pas les mêmes dimensions en longueur et en grosseur, élever successivement la température de chaque soudure au même degré, toutes les autres étant à zéro, et voir quelles étaient les intensités des courants : l'expérience fit voir que les intensités étaient égales.

M. Becquerel a fait une vérification très-remarquable des nombres relatifs au pouvoir thermo-électrique des métaux. On sait que, quand la température est la même dans toutes les parties d'un circuit composé de fils de différents métaux, le courant est nul : il faut donc que la somme des nombres qui représentent l'intensité des courants, pris chacun avec leurs signes, soit égale à zéro : or, c'est à quoi les nombres trouvés satisfont parfaitement bien.

Prenons, par exemple, le circuit fer, platine, argent, cuivre, et affectons du signe + l'intensité du courant qui va à droite : en désignant par A, B, C, D, les courants développés aux quatre soudures, on aura

A (fer, platine)	$= 133{,}50 - 97{,}50 =$	36,00
B (platine, argent)	$= 97{,}50 - 107{,}30 =$	$-$ 9,80
C (argent, cuivre)	$= 107{,}30 - 106{,}54 =$	1,76
D (cuivre, fer)	$= 105{,}54 - 133{,}50 =$	$-$ 27,96

dont la somme est nulle.

Digitized by Google

1164. La chaleur peut aussi produire des courants dans des circuits non métalliques; d'après Nobili, deux cylindres d'argile de 2 à 3 ponces de longueur et de 3 à 4 lignes de diamètre, en communication par une de leurs extrémités avec un multiplicateur, et dont les deux autres sont mises en contact après qu'une d'elle a été chauffée au rouge, produisent un courant qui va de la partie froide à la partie chaude.

1165. *Piles thermo-électriques.* Si on forme un circuit fermé avec un grand nombre de fils ou de tiges de deux métaux soudés alternativement bout à bout, et qu'on chauffe les soudures de rangs pairs ou impairs, les autres étant maintenues à une température constante moins élevée, on obtient des courants qui, pour la même différence de température, ont des intensités qui augmentent avec le nombre des éléments. Les premières piles thermo-électriques ont été construites par MM. Fourier et Œrsted. La *fig.* 715 représente la disposition qu'ils ont employée : la pile est formée de barreaux de bismuth et d'antimoine ; les premiers portent à une de leurs extrémités un appendice que l'on peut plonger dans de la glace afin de maintenir la soudure correspondante à une température peu différente de 0°; les autres soudures sont chauffées directement par des lampes. Dans une pile à 6 éléments, en chauffant successivement 1, 2, 3, 4... 6 soudures, ils ont obtenu des déviations de 9°; 15°, 75; 18°,5 ; 22° ; 25°,66 ; et 28°,66.

1166. On peut disposer les piles d'une manière beaucoup plus commode, fondée sur la propriété que possèdent les courants thermo-électriques de ne pas passer à travers l'eau ordinaire : on se sert d'éléments ayant la forme de fer à cheval et on les soude latéralement, de manière que toutes les soudures de rangs pairs soient d'un côté, et toutes les soudures de rangs impairs de l'autre; alors on peut plonger toutes les premières dans un seul vase renfermant de la glace ou un mélange frigorifique, et toutes les autres dans un seul vase renfermant de l'eau ou de l'huile chaude. Cette disposition est très-facile à exécuter avec des fils de fer et de cuivre. J'ai reconnu que, dans une pile de fer et cuivre de 100 éléments, l'intensité du courant était proportionnelle aux nombres d'éléments, maintenus à des températures différentes quand le circuit restait toujours le même; mais quand le circuit ne renferme que les éléments dont on fait varier la température, l'intensité du courant augmente dans un plus petit rapport que le nombre des éléments.

1167. Lorsque les piles sont destinées à fonctionner sous l'influence du calorique rayonnant, on les construit avec les métaux dont la puissance thermo-électrique diffère le plus, avec des barreaux de bismuth et d'antimoine. On les soude de manière à leur donner la forme d'un zig-zag très-serré, et on isole les barreaux les uns des autres avec du papier. C'est ainsi que sont construites les piles des appareils de M. Melloni. Cette disposition présente de très-grandes difficultés dans l'exécution, à cause des petites dimensions des barreaux et de leur fragilité. Leur effet n'augmente pas à beaucoup près proportionnellement au nombre des éléments, à cause de l'accroissement de longueur du circuit. Nobili a imaginé récemment de disposer les éléments en rayons : l'effet est plus prompt, l'étendue de l'orifice d'accès des rayons de chaleur est beaucoup plus petite, et la pile se refroidit plus rapidement.

1168. *Mesure des températures par les courants thermo-électriques.* Les circuits thermo-électriques peuvent être employés pour mesurer les hautes températures : il suffit pour cela de prendre deux fils métalliques d'un petit diamètre, formés de deux métaux peu différents relativement à leurs propriétés thermo-électriques, tels que le platine et le palladium, ou de platine inégalement purifié, tels que ceux qu'on désigne sous le nom de platine mou et de platine dur, tordus par un de leurs bouts et dont les autres communiquent avec les extrémités d'un rhéomètre multiplicateur. On maintient ces deux dernières jonctions à une température constante, tandis

Digitized by Google

que la première est plongée dans la source dont on veut mesurer la température. L'aiguille du rhéomètre est déviée d'autant plus que la température est plus élevée, mais suivant des lois encore inconnues.

1169. On peut se servir de la même disposition pour déterminer la température dans la mer ou dans la terre à une grande profondeur; mais il faut alors employer des métaux ayant une grande puissance thermo-électrique, tels que le fer et le cuivre, et, pour soustraire le circuit à l'influence des courants qui pourraient résulter du contact des fils avec les corps environnants, les deux fils doivent être étamés sur toute leur longueur, recouverts de soie et goudronnés. On ne peut pas cependant se servir de ces appareils pour observer la température à une très-grande distance, à cause de la résistance que la grande longueur des fils oppose au mouvement de l'électricité; au delà de 400 pieds, pour des fils de 1 millimètre de diamètre, une variation de température de 10° à 15° est peu sensible au rhéomètre.

1170. MM. Becquerel et Breschet ont employé la même disposition pour mesurer la température des différents tissus des animaux; ils se sont servis d'aiguilles semblables à celles employées dans l'acuponcture, qui peuvent traverser la plupart des organes sans altérer leurs fonctions; elles étaient formées de deux aiguilles très-minces, l'une d'acier, l'autre de cuivre, soudées par une de leurs extrémités, vernies dans toute leur étendue, et séparées dans le reste de leur longueur par une membrane très-mince, ou soudées bout à bout quand l'aiguille devait traverser le corps de part en part; les jonctions extérieures étaient maintenues à une température constante au moyen d'un appareil de M. Sorel. On ne pouvait pas employer de la glace attendu que, la différence de température étant trop grande, la déviation de l'aiguille était trop considérable.

1171. Les piles thermo-électriques peuvent être employées pour reconnaître les variations de température produites dans un conducteur traversé par un courant. Il suffit d'appliquer une des soudures contre le conducteur, les autres étant à la température ordinaire; ou, de chaque côté du fil, deux soudures séparées par une autre intermédiaire. C'est ainsi que M. Peltier a reconnu l'uniformité de température d'un fil homogène d'un diamètre constant traversé par un courant hydro-électrique, et les variations de température qui se produisent au contact de deux métaux qui font partie d'un circuit fermé, suivant le sens du courant et la nature des métaux (1113, 1119).

1172. *Actions chimiques produites par les courants thermo-électriques.* Comme la tension des courants thermo-électriques est très-faible, il faut employer des piles à un grand nombre d'éléments pour que le courant puisse passer même à travers les liquides les plus conducteurs. M. Botto, de Turin, avec une pile de 120 éléments formés de fils de platine et de fer de 1 pouce de longueur et de 1/4 de millimètre de diamètre, en chauffant avec une lampe à esprit de vin les soudures paires ou impaires, est parvenu à décomposer de l'eau acidulée : la décomposition était plus énergique quand on faisait plonger des fils de cuivre dans l'eau. M. Becquerel est parvenu à décomposer des sels par un seul élément, platine et cuivre, en fixant aux extrémités libres des fils de cuivre, de zinc, d'étain, d'argent et de plomb, qu'il plongeait chacun dans une des branches d'un tube recourbé en U et rempli d'une dissolution saline, ayant pour base l'oxyde du même métal que les fils immergés; cette dernière condition étant indispensable pour que la décomposition ait lieu, il semblerait que les métaux facilement réductibles sont plus disposés à se précipiter sur les lames de même métal que sur d'autres métaux, en vertu de la force d'aggrégation. Un circuit platine et fer ne produit point de décomposition; on n'en connaît point la cause.

Digitized by Google

§ X. *Courants produits par l'électricité développée dans le frottement.*

1173. L'électricité développée par le frottement peut produire des courants jouissant de toutes les propriétés des courants provenant des autres sources électriques. Nous avons rapporté précédemment une expérience de M. Faraday (957), et une autre de Wollaston (961), qui prouvent que les courants provenant des machines électriques produisent des actions chimiques. M. Arago avait reconnu que, quand un fil de cuivre est tourné en hélice, dont une des extrémités communique avec le sol, et dont l'autre, terminée en pointe, soutire l'électricité d'un conducteur, le courant aimante une aiguille placée dans l'intérieur de l'hélice. Mais M. Colladon est le premier qui soit parvenu à faire dévier une aiguille aimantée par le courant provenant d'une machine ou d'une batterie électrique.

Le multiplicateur pour les courants provenant de sources développant de l'électricité à haute tension doit être formé d'un fil de cuivre doublement recouvert de soie et verni à la gomme laque, afin d'éviter le passage direct de l'électricité dans les parties voisines des circonvolutions, et il doit faire un grand nombre de tours : celui dont M. Colladon s'est servi avait 500 tours.

En mettant une des extrémités du fil en contact avec l'armure extérieure d'une batterie chargée, et en approchant l'autre, qui était terminée en pointe, d'un conducteur communiquant avec l'autre armure, M. Colladon obtint une déviation qui était sensiblement constante pendant un certain temps, qui croissait lorsqu'on approchait la pointe du conducteur, et qui changeait de sens lorsqu'on alternait les extrémités du fil du multiplicateur. En mettant une des extrémités du fil en contact avec un des frottoirs d'une machine électrique, et en approchant l'autre du conducteur, on obtient de même des déviations qui croissent à mesure que la distance de la pointe au conducteur devient plus petite, et que la vitesse de rotation de la machine augmente. Enfin, si on met les fils en communication avec les conducteurs positifs et négatifs d'une machine de Nairne, on obtient aussi une déviation permanente pour une vitesse constante. Avec une machine ordinaire, en mettant un seul coussin en contact avec une des extrémités du fil et l'autre en contact avec le conducteur, l'aiguille du multiplicateur est agitée dans tous les sens par une tension électrique positive. Cet effet provient probablement de ce que les coussins ne communiquent entre eux que par des conducteurs imparfaits.

1174. M. Colladon a employé le multiplicateur dont il s'était servi dans ces expériences pour reconnaître l'électricité de l'atmosphère. Une extrémité du fil fut mise en communication avec la base d'un paratonnerre isolé, l'autre avec une tige qui plongeait dans un puits : dans les temps d'orage l'aiguille est dans un mouvement continuel, chaque éclair est immédiatement suivi, quelquefois même précédé, d'un changement subit dans le sens de la déviation, ou seulement d'un accroissement de déviation. Depuis, M. Peltier a repris ces dernières expériences, et a obtenu les résultats suivants. Pendant un temps d'orage un courant positif a constamment traversé le fil de bas en haut : ainsi, l'atmosphère était négative ; l'aiguille a éprouvé de grandes variations comprises entre 0° et 50°, et qui paraissaient coïncider avec le passage des nuages ; quand la pluie survint, elles devinrent moins considérables, et l'aiguille se maintint entre 20° et 30° ; quelques renversements eurent lieu. Comme le multiplicateur communiquait avec l'atmosphère, non pas par la tige du paratonnerre, mais par un fil de cuivre qui s'élevait au-dessus du toit, M. Peltier pense que ces dernières déviations provenaient d'une action voltaïque dont les gouttières et les tuyaux

Digitized by Google

formaient l'élément positif, et le fil de cuivre l'élément négatif, communiquant entre eux par l'eau qui mouillait la maison et le sol.

M. Colladon a constaté que, dans les temps de pluie, la quantité d'électricité soutirée dans l'atmosphère par un arbre est très-sensiblement égale à celle qui est soutirée par une tige métallique de même hauteur et terminée par une pointe aiguë.

1175. *Aimantation par les décharges électriques.* Lorsqu'on fait passer à travers un fil droit la décharge d'une batterie électrique, de petites aiguilles d'acier placées perpendiculairement à la direction du fil sont aimantées ; on obtient un plus grand effet quand le fil est tourné en spirale autour d'un tube de verre renfermant l'aiguille. On avait pensé d'abord que l'aimantation par des décharges électriques à travers un fil droit ou tourné en spirale avait lieu dans le même sens que par les courants voltaïques ; mais M. Savary, qui a fait une étude spéciale de l'aimantation par des décharges électriques, a découvert des phénomènes fort remarquables. Lorsqu'on fait passer une décharge électrique à travers un fil droit au-dessous duquel se trouvent placées des aiguilles égales, transversalement et sur un plan incliné, de manière que la distance des aiguilles au fil soit croissante, les aiguilles ne sont pas toujours toutes aimantées dans le même sens ; l'existence et le nombre des changements de signe dans l'aimantation, ainsi que la distance à laquelle se trouve l'aiguille qui possède le maximum d'aimantation, quand toutes sont aimantées dans le même sens, dépendent du diamètre du fil, de sa longueur, de l'intensité des décharges et de la trempe des aiguilles. L'aimantation dans les hélices, toujours par les décharges de batteries, varie en intensité et en direction avec l'intensité des décharges, le diamètre et le pas de l'hélice, avec sa longueur, quand elle n'est pas très-grande par rapport à celle de l'aiguille, et enfin avec la nature et l'épaisseur des substances qui enveloppent les aiguilles. L'aimantation par les courants voltaïques présente des phénomènes analogues, mais seulement quand la conductibilité de la pile est très-faible. Ainsi, par exemple, une pile de 20 éléments a produit des aimantations opposées quand elle était montée avec un liquide très-bon conducteur ou faiblement conducteur. D'après des recherches plus récentes de M. Llambias, il paraîtrait que des décharges électriques égales et successives n'agissent pas toujours de la même manière sur une même aiguille, qu'elles sont tantôt dans un sens, tantôt dans un autre. Les lois et les causes de ces phénomènes singuliers sont complétement inconnues.

§ XI. *Électricité développée dans les actions chimiques.*

1176. *Électricité dégagée par la combustion.* Si on place à quelques centimètres au-dessous du plateau supérieur d'un condensateur un cylindre de charbon (*fig.* 715 A) communiquant avec le sol, en allumant le charbon à sa partie supérieure, la colonne d'acide carbonique qui s'élève transmet au plateau de l'électricité positive ; si on place le charbon sur le plateau supérieur (*fig.* 715 B), par sa combustion le plateau se charge d'électricité négative : ainsi, dans la combustion du charbon, l'acide carbonique se charge d'électricité positive et le charbon d'électricité négative. Le même effet se produit dans la combustion de l'hydrogène : en faisant dégager ce gaz à l'extrémité d'un tube métallique isolé et communiquant avec un des plateaux du condensateur, ce dernier se charge d'électricité négative (M. Pouillet).

1177. *Électricité dégagée dans la décomposition des corps dont un des éléments est volatil.* Si on soude au plateau supérieur d'un condensateur, et dans le même plan, une lame de cuivre destinée à supporter à son extrémité un petit creuset de platine, en versant dans le creuset incandescent de l'eau distillée, le condensateur n'indique rien ; les acides sulfuriques, nitriques et acétiques se comportent de la

Digitized by Google

même manière. Avec des dissolutions de chaux, de strontiane ou d'une autre base fixe, le creuset prend l'électricité positive; avec des dissolutions de gaz, d'acides et de la plupart des sels, le creuset prend l'électricité négative. Quand le creuset renferme des sels décomposables dont un des éléments est fixe, les bases prennent l'électricité positive et les acides l'électricité négative. Lorsqu'on emploie un creuset de fer, et qu'on y verse quelques gouttes d'eau distillée, le creuset se charge d'électricité négative : dans ce cas, l'effet de l'évaporation est nul; mais le métal, en s'oxydant, se charge d'électricité négative.

En général, quand on projette dans un creuset incandescent un liquide volatil capable d'attaquer le métal du creuset, ce dernier se charge toujours d'électricité négative.

Si, après avoir placé sur le plateau du condensateur une capsule de platine remplie d'acide sulfurique, on y plonge une lame de zinc, le condensateur indique que l'acide se charge d'électricité positive. En employant de l'acide étendu, l'action chimique est beaucoup plus grande, et cependant le condensateur ne se charge pas : M. de Larive explique cette différence par la grande conductibilité de l'acide étendu, qui permet aux deux électricités développées de se recombiner immédiatement.

En employant des capsules de différents métaux remplies de différents liquides, et y plongeant des lames métalliques de différente nature, M. Becquerel a obtenu les résultats suivants :

Avec une capsule de platine renfermant de l'acide sulfurique concentré ou étendu, ou une dissolution de potasse, des lames d'or, d'argent, de cuivre, de fer, de plomb et de zinc, ont toujours donné à la capsule l'électricité positive.

Avec une capsule de cuivre renfermant de l'acide sulfurique concentré, des lames d'or, d'argent, de platine, de fer, de plomb et de zinc ont donné à la capsule les électricités —, —, —, 0, 0, —. En employant de l'acide sulfurique étendu, avec les mêmes métaux, la capsule a pris les états électriques suivants : —, —, —, +, —, +. Enfin, avec une dissolution de potasse, il n'y a eu de différence que pour le plomb, qui n'a pas produit d'électricité appréciable.

Si on admet que l'électricité ne se dégage que dans l'action chimique, tous les effets produits en employant des capsules de platine proviennent de l'action des lames métalliques plongées dans les liquides, et, quand on emploie des capsules de cuivre, de la différence des effets produits sur les métaux; mais, si on admet qu'il y ait de l'électricité développée dans le contact sans action chimique, tous les effets obtenus résultent de la différence des actions du liquide sur les deux métaux.

Dans les phénomènes où un seul corps reste en communication avec l'électroscope, il ne peut y avoir aucune incertitude sur la nature de l'électricité dont les deux corps se sont chargés dans l'action chimique qui a accompagné la séparation; mais il n'en est pas de même quand on veut déterminer les électricités dont se chargent les corps par leur action réciproque lorsqu'ils font partie d'un circuit électrique : car, de quelque manière que l'on s'y prenne, il y aura, de chaque côté, des corps qui agissent les uns sur les autres, d'autres qui seront de nature différente; il y aura toujours au moins trois contacts entre des corps de nature différente, et par conséquent incertitude complète sur la participation de chacun à l'effet observé. Les physiciens qui ont adopté l'opinion que les effets voltaïques ne résultent que des actions chimiques n'ont alors à considérer que les contacts qui sont accompagnés d'action chimique, et l'incertitude cesse, du moins dans beaucoup de cas. Nous nous contenterons de décrire quelques expériences de M. Becquerel pour faire comprendre le mode d'expériences qu'il a employé, et nous donnerons les conséquences auxquelles il a été conduit.

Digitized by Google

1178. Pour observer les actions des dissolutions salines les unes sur les autres, M. Becquerel emploie quatre capsules, *A, B, C, D* (*fig.* 716), la première et la dernière en platine, la seconde et la troisième en porcelaine. Supposons que les capsules extrêmes et la deuxième renferment de l'acide nitrique, la troisième une dissolution alcaline; que la première et la deuxième, ainsi que la troisième et la quatrième, communiquent par des tubes recourbés pleins d'eau, et la deuxième et la troisième par une mèche d'amiante: si on met les capsules *A* et *D* en communication avec les extrémités d'un multiplicateur par des fils de platine, il se produit un courant dans le sens *DA* à travers les liquides. Dans cette expérience, la partie du circuit qui n'est pas symétrique est ainsi composée: *eau, acide, alcali, eau*. M. Becquerel admet que, les actions de l'eau sur l'acide et sur l'alcali étant plus faibles que l'action de l'acide sur l'alcali, on doit considérer cette dernière action comme l'emportant sur les autres, et par conséquent le courant comme résultant de l'action chimique de ces deux substances, dans laquelle l'acide prend à l'alcali l'électricité positive. Ces déductions sont bien peu rigoureuses.

Si on prend deux capsules de porcelaine *A* et *B* (*fig.* 717), remplies l'une d'acide, l'autre d'une dissolution alcaline, et réunies par une mèche d'amiante, en y plongeant les extrémités de platine du fil du multiplicateur, on trouve, comme précédemment, que le courant indique que l'acide prend à la dissolution alcaline l'électricité positive; mais dans cette conclusion on suppose qu'il n'y a point d'électricité développée par le contact du platine et de chacune des dissolutions.

M. Becquerel emploie encore une autre méthode : il fixe à une des extrémités du multiplicateur une cuiller en platine, qu'il remplit d'une des dissolutions; il plonge une tige en platine fixée à l'autre extrémité dans l'autre liquide, et ensuite dans celui de la cuiller.

Ces expériences ont conduit M. Becquerel à admettre que les acides étaient positifs par rapport aux bases et à l'eau, que l'eau était positive par rapport aux bases salines, et que, dans les combinaisons et les décompositions des corps, les mêmes éléments se chargeaient d'électricités contraires.

1179. *Quantité d'électricité dégagée dans les actions chimiques.* D'après M. Faraday, un grain d'eau acidulée exige pour sa décomposition un courant électrique continu pendant 3′ 45″, suffisant pour maintenir à la chaleur rouge, dans l'air, pendant le même temps, un fil de platine de 1/104 de pouce de diamètre; et pour opérer cette décomposition il faudrait employer une pile à plaques de zinc amalgamé, dans laquelle la quantité de zinc dissoute par chaque élément serait égale à 3,56 grains. Quelle immense quantité d'électricité développée par la dissolution d'une si petite quantité de zinc, quand on considère l'énormité de la vitesse! M. de Larive estime que la quantité d'électricité développée par la dissolution d'un gramme de zinc dépasse celle qui se dégage dans les plus violents coups de foudre.

1180. *Influence du contact de deux métaux sur l'action chimique exercée par l'un d'eux sur un liquide.* Lorsque deux corps métalliques sont en contact, et plongés dans un liquide, les effets chimiques qu'ils éprouvent sont bien différents de ceux que chaque métal éprouverait s'ils étaient isolés, parce qu'alors les deux métaux et le liquide forment une véritable pile: l'un des métaux est attaqué par les éléments acides résultant de la décomposition du liquide, et sur l'autre viennent se déposer les bases des sels et l'hydrogène. Davy avait imaginé de préserver le doublage en cuivre des vaisseaux avec de petites quantités de zinc, de fer ou de fonte, mises en contact avec le cuivre : le métal est en effet préservé; mais il se dépose sur le cuivre du carbonate de chaux, des sels de magnesie; les plantes et certains animaux s'y attachent, et cette croûte extérieure ralentit la marche du navire.

Digitized by Google

1181. *Effet produit dans les actions capillaires.* Une cuiller de platine remplie d'acide nitrique concentré est fixée à l'extrémité du fil d'un multiplicateur; à l'autre extrémité se trouve un fil de platine supportant un morceau d'éponge de platine. En plongeant l'éponge dans l'acide il se produit un courant qui va de l'éponge au liquide, comme si l'éponge avait pris au liquide l'électricité négative; mais bientôt un courant en sens contraire se développe, continue quelque temps, diminue et disparaît. Avec de l'acide nitrique étendue de la moitié de son poids d'eau, on observe que le premier courant, après avoir duré quelques instants, s'affaiblit et disparaît. En employant de l'acide hydro-chlorique concentré, les effets sont inverses de ceux que présente l'acide nitrique concentré. Lorsqu'on retire l'éponge de l'acide nitrique concentré, et qu'après l'avoir chauffée légèrement on la plonge de nouveau dans l'acide, le courant va de l'acide à l'éponge, et persévère dans cette direction jusqu'à ce que l'égalité de température soit établie. Ce dernier effet, qui est bien le résultat de la différence de température, explique le courant secondaire dans la première expérience; mais le courant primitif, et les circonstances particulières que présentent l'acide nitrique étendu et l'acide hydro-chlorique, sont sans explication (M. Becquerel).

§ XII. *Conductibilité.*

1182. *Vitesse des courants.* En établissant la communication entre les deux pôles d'une pile au moyen d'un fil de cuivre de 700 pieds de long, et plaçant une aiguille aimantée en un point quelconque du fil, on n'a pu observer aucun intervalle de temps appréciable entre l'instant de la fermeture du circuit et l'ébranlement de l'aiguille : ainsi, l'électricité se meut avec une grande vitesse dans les corps conducteurs : on ne sait pas si cette vitesse varie avec la nature des corps, et, pour chacun d'eux, avec la nature de la source électrique.

1183. *Égalité d'action dans les points du circuit.* Lorsqu'un courant électrique est établi, le courant a la même intensité dans tous les points du circuit, qu'il soit formé avec un seul fil métallique d'un même diamètre ou de diamètre variable, ou avec des fils de différents métaux, ou avec des corps solides et liquides de forme et de nature quelconque. Il en est alors de l'électricité comme de l'écoulement d'un fluide par un canal de forme quelconque, par chaque section il passe à chaque instant la même quantité de fluide.

1184. *Égalité d'action dans les points de la section d'un conducteur.* Dans un circuit quelconque, l'électricité ne se porte point à la surface des conducteurs comme l'électricité en repos; le courant se propage uniformément à travers les conducteurs. C'est ce qui résulte des expériences que nous allons rapporter. Un fil métallique d'une certaine longueur communiquant avec les extrémités d'une pile agit de la même manière sur une aiguille aimantée qu'un nombre quelconque de fils de même longueur dont la somme des sections est égale à la sienne. Si on prend une plaque de cuivre mince, par exemple de $0^m,15$ de longueur et de $0^m,03$ de largeur, dont les extrémités communiquent avec une pile, et si on applique sur cette plaque, en deux points dirigés suivant sa longueur, les deux extrémités d'un rhéomètre multiplicateur très-sensible, on obtient toujours la même déviation, quelle que soit la position des points de contact. Ainsi, la plaque peut être considérée comme parcourue par des courants élémentaires parallèles et égaux. C'est sur ce fait que nous avons établi la construction des rhéomètres, dans lesquels les intensités des courants sont proportionnelles aux tangentes des déviations (p. 140).

1185. *Influence de la longueur et de la section d'un fil conducteur sur l'intensité du courant qu'il transmet.* L'influence de la section et de la longueur d'un

Digitized by Google

fil conducteur ont d'abord été déterminées par H. Davy. Voici la méthode qu'il a employée. Concevons une pile de Wollaston formée d'un grand nombre d'éléments plongée dans de l'eau faiblement acidulée, afin qu'elle conserve longtemps son énergie; supposons que deux fils communiquant avec les pôles plongent dans un vase pour décomposer de l'eau acidulée : si en même temps on fait communiquer les pôles par un fil de métal, une partie du courant passera par ce fil, une moindre partie passera à travers l'eau, et la décomposition de ce liquide se fera avec moins d'intensité. On conçoit alors qu'on peut faire varier la longueur et le diamètre du fil conducteur de manière que tout phénomène chimique cesse : la pile est alors déchargée, du moins sous le rapport des effets chimiques. Si on suppose les quantités d'électricité produites par les piles proportionnelles aux nombres des éléments, et en comparant les longueurs et les sections des fils de même nature qui déchargent des piles renfermant des nombres différents d'éléments, Davy est parvenu à établir ces deux lois générales : *la conductibilité est en raison inverse de la longueur du fil, et proportionnelle à sa section.* Et, en comparant les nombres de couples que déchargent des fils de même longueur, de même diamètre et de différente nature, le même physicien a obtenu les conductibilités relatives de ces corps, que nous donnerons plus loin.

1186. Plus tard, M. Becquerel est parvenu aux mêmes résultats par un moyen plus exact. Concevons deux fils de même nature, de même longueur et de même diamètre, enroulés en sens contraire sur le cadre d'un multiplicateur; les quatre extrémités des fils plongent dans quatre capsules pleines de mercure, que nous désignerons par n et p, et n' et p'. Supposons maintenant qu'un des pôles d'une pile quelconque soit mis en communication par des fils identiques avec les capsules n et n', et que l'autre pôle communique de la même manière avec les capsules p et p' : les courants qui parcourront le multiplicateur seront égaux et l'action sur l'aiguille sera nulle. Mais si on fait communiquer les capsules n et n', ainsi que les capsules p et p', par des fils conducteurs non identiques, l'aiguille du multiplicateur ne sera immobile qu'autant que ces deux fils auront la même faculté conductrice. On trouve ainsi qu'un fil de cuivre conduit autant que deux fils de même diamètre d'une longueur double, ou que trois fils de même diamètre d'une longueur triple; d'où résultent les deux lois trouvées par Davy. En prenant des fils de même diamètre, de différente nature, et faisant varier leur longueur jusqu'à ce que l'aiguille reste stationnaire, la conductibilité des substances dont les fils sont formés est évidemment en raison inverse des longueurs de ces fils.

1187. Plusieurs physiciens, en employant des sources électriques différentes, et en faisant varier la longueur des fils, avaient trouvé que les intensités des courants suivaient des lois différentes et qui dépendaient de la nature de la source : ainsi, l'influence d'un accroissement de longueur du fil pour une source thermo-électrique était beaucoup plus grande que pour une pile hydro-électrique, et d'autant plus que la pile renfermait un plus grand nombre d'éléments; et on regardait par conséquent les lois de la conductibilité comme variables avec la nature des sources. Mais des expériences précises de M. Pouillet ont fait voir qu'il n'en est pas ainsi. M. Pouillet a constaté que, pour une même pile, et un même fil, dont on fait seulement varier la longueur, l'intensité magnétique du courant est en raison inverse de la longueur du fil, augmentée d'une quantité constante, qui représente la résistance de la pile estimée en longueur du fil, et qui par conséquent varie avec la section et la nature du fil. Il résulte de cette loi 1° que la somme des actions magnétiques du circuit est constante, puisque la longueur du circuit compense toujours la variation d'intensité; 2° que l'influence de l'accroissement de longueur du fil sur l'intensité du courant est

Digitized by Google

d'autant plus petite que la conductibilité de la pile est plus petite. Ainsi elle sera très-grande pour les sources thermo-électriques, et très-faible pour les piles hydro-électriques, et d'autant plus qu'elles contiendront un plus grand nombre d'éléments.

Les lois découvertes par M. Pouillet s'accordent très-bien avec celle de Davy, car toutes les parties du circuit suivent bien la loi de Davy; mais pour les constater il fallait ou faire intervenir l'influence de la totalité du circuit, si on faisait varier l'intensité du courant, ou rendre le courant constant par la méthode de M. Becquerel, et ne considérer alors que les parties variables du circuit.

1188. *Rapport de conductibilité des métaux.* Le tableau suivant renferme les résultats obtenus par différents physiciens.

DAVY. ÉLECTRICITÉ voltaïque.		BECQUEREL. ÉLECTRICITÉ voltaïque.		HARRIS. ÉLECTRICITÉ voltaïque.		CHRISTIE. ÉLECTRICITÉ d'induction.		CUMMINGUE. ÉLECTRICITÉ thermoïque.		POUILLET. ÉLECTRICITÉ d'un seul couple.	
Argent	109	Cuivre	100	Cuivre	100	Argent	152	Argent	176,5	Argent à 0,986	116
Cuivre	100	Or	93,6	Argent	100	Or	110,6	Cuivre	100	Cuivre rouge	100
Or	73	Argent	73,6	Or	66,7	Cuivre	100	Zinc	53	Argent à 0,948	88
Plomb	69	Zinc	28,5	Zinc	33,3	Zinc	52,2	Or	35,1	Or fin	84
Platine	18	Platine	16,4	Platine	20	Étain	25,5	Fer	24,5	Argent à 0,800	77
Fer	14,5	Fer	15,8	Fer	20	Platine	24,5	Étain	23,9	Laiton	26
		Étain	15,5	Étain	16	Fer	22,3	Platine	21,6	Fer	16
		Plomb	6,5	Plomb	8,3	Plomb	12,4	Plomb	16,5	Or à 18 karats	15
		Mercure	3,5							Platine	13
		Potassium	1,3								

M. Harris a employé la chaleur produite par le passage de l'électricité en admettant qu'elle est en raison inverse de la conductibilité.

L'appareil employé par M. Christie consistait en un cylindre de fer doux (*fig.* 718), entouré d'une spirale de cuivre dont les deux bouts se rendaient aux deux extrémités *a* et *b* d'un rhéomètre à un seul fil; mais les points *c* et *b*, ainsi que les points *a* et *d*, étaient réunis par des fils égaux du métal qu'on voulait comparer avec le cuivre, et dont on faisait varier la longueur jusqu'à ce que l'aiguille restât stationnaire. En approchant des points *A* et *B* les pôles *N* et *S* d'un aimant en fer à cheval, les longueurs des fils *ac* et *bc* servaient à déterminer la conductibilité, en supposant que les facultés conductrices étaient en raison inverse des longueurs des fils et en raison directe des sections.

Pour les courants thermo-électriques M. Pouillet a trouvé les résultats suivants :

Palladium	579	Cuivre recuit	384
Argent à 0,963	515	Platine	855
Argent à 0,900	475	Laiton	120
Argent à 0,857	422		90
Argent à 0,747	388	Acier fondu	80
Or pur	397		50
Or à 0,951	133	Fer	70
Cuivre pur	383		60

D'après le même physicien, la température n'a qu'une faible influence sur la

Digitized by Google

conductibilité de certains corps, tandis qu'elle est très-grande sur d'autres; le fer et l'acier sont dans ce dernier cas.

On voit d'après les résultats des expériences de M. Pouillet combien la présence des métaux étrangers a d'influence sur la conductibilité; il est probable que cette circonstance a dû influer sur les résultats obtenus par les autres physiciens, et peut-être autant que l'inexactitude des méthodes.

1189. On a reconnu que le charbon bien cuit, qui, comme on sait, est mauvais conducteur de la chaleur, est bon conducteur de l'électricité; qu'un fil recuit est meilleur conducteur que le fil dur; que la flamme d'une lampe à alcool conduit l'électricité; que la chaleur diminue la faculté conductrice des métaux. On peut constater ce dernier fait en plaçant entre les deux pôles d'une pile un fil assez fin pour qu'il soit échauffé au rouge par le courant; si on chauffe le fil dans des points où il n'est pas incandescent, l'incandescence diminue, et elle augmente quand on refroidit le fil dans les points environnants. Mais les corps solides mauvais conducteurs, tels que les sels, acquièrent souvent au contraire la faculté de conduire l'électricité lorsqu'ils ont été chauffés au point d'être liquéfiés; tels sont la glace, le nitre, la potasse, la soude; les chlorures de plomb, de potasse, de soude; le sulfate de potasse, le protoxyde de plomb. Le soufre, le phosphore, l'iodure de soufre, le périodure d'étain, l'orpiment, le réalgar, les acides margariques, oléiques, l'acide acétique cristallisé, le camphre artificiel et la résine ne jouissent point de cette propriété. Le verre ne devient conducteur par la chaleur qu'autant qu'il contient une suffisante quantité de potasse ou de plomb. La conductibilité du sulfure d'argent et de l'argent rouge est augmentée par une température peu élevée; tous deux donnent des étincelles avec le charbon. Les autres sulfures métalliques conduisent plus ou moins à froid; mais leur faculté conductrice ne paraît pas augmenter par la chaleur. La glace et l'iodure de potassium fondu, qui ne conduisent pas l'électricité à petite tension, sont conducteurs de l'électricité à grande tension provenant des machines (Faraday).

Quand un circuit renferme deux fils de même nature, mais de diamètre différent, le courant a plus d'intensité lorsque l'électricité positive passe du fil le plus fin au fil le plus gros que dans le cas contraire; dans un circuit formé de cuivre et de zinc, l'électricité positive passe plus facilement du cuivre au zinc que du zinc au cuivre, et le contraire a lieu pour l'électricité négative. Il y a une certaine analogie entre les séries des métaux rangés suivant l'ordre de leur conductibilité pour la chaleur et l'électricité; mais la grande différence que présente le charbon relativement à sa conductibilité pour la chaleur et l'électricité ne permet pas de supposer qu'il y ait identité.

1190. *Conductibilité des liquides.* Dans un circuit formé en partie par un canal plein de liquide, l'intensité du courant est la même dans tous les points du circuit. L'intensité du courant est aussi la même dans tous les points d'une même section : c'est ce qu'on peut facilement reconnaître en plongeant dans le liquide et à différentes profondeurs deux fils de cuivre communiquant avec les extrémités d'un rhéomètre multiplicateur, maintenus à une distance fixe et recouverts de vernis sur toute leur étendue excepté aux extrémités (Nobili). On peut encore constater ce fait par un autre mode d'expérience également dû à Nobili. Si on divise un canal en un nombre quelconque de compartiments égaux ou inégaux, et si on verse dans chacun, à la même hauteur, une dissolution d'acétate de plomb, les lames métalliques sont toutes colorées du même côté par les éléments électro-positifs qui s'y déposent en y formant une teinte uniforme, et les faces opposées se recouvrent d'une couche de plomb d'une épaisseur aussi uniforme. L'uniformité de distribution des courants dans la section du canal subsiste encore quand la section du canal devient plus grande ou plus petite; quand le canal est en partie seulement intercepté par une plaque métallique, la

Digitized by Google

plus grande partie du courant se détourne pour éviter l'obstacle. Lorsque l'intensité du courant sur l'unité de section augmente par le rétrécissement du canal, l'action chimique ne croît pas proportionnellement à l'accroissement d'intensité du courant. Lorsqu'un courant parcourt un large canal plein d'un liquide conducteur, dans lequel il pénètre et d'où il sort par de larges plaques de platine, et qu'on observe les intensités des courants élémentaires à l'aide de deux pointes maintenues à une distance constante, qui sont fixées aux extrémités d'un rhéomètre, et qu'on place à différents points du canal et à différentes profondeurs, on trouve que l'intensité est à son minimum au milieu du canal, qu'elle est plus grande dans le voisinage du pôle positif, et un peu plus faible près du pôle négatif; qu'il existe des courants intenses derrière la plaque positive, et qu'il n'en existe point derrière la plaque négative. Ainsi tout se passe comme si les courants élémentaires traversaient le liquide en rayonnant tout autour du pôle positif et convergeaient vers le pôle négatif (Matteucci).

1191. M. Matteucci, intercalant dans un circuit des dissolutions renfermant 1/100 de différents corps, dans lesquelles le courant entrait et sortait par des fils de platine, a obtenu les résultats suivants :

	Déviation.		Déviation.
Eau distillée	2°	Bi-oxalate de potasse	14°
Sulfate double de potasse et d'alumine	4,30′	Sulfate de cuivre	20
Chlorure de calcium	5	Nitrate de mercure	35
Chlorure de potassium	5	Nitrate d'argent	45
Sulfate de magnésie	6	Acide oxalique	14
Sulfate neutre de fer	6	» tartrique	10
Chlorure de sodium	7	» hydro-chlorique	10
Nitrate de potasse	7	» sulfurique	8
Hydro-chlorate d'ammoniaque	8	» nitrique	8
Chlorure de barium	9	Potasse	15
Acétate neutre de plomb	9	Ammoniaque	8

Avec l'acétate de plomb et les nitrates d'argent et de mercure seulement on a observé des traces de décomposition.

Le sucre et l'iodure de soufre étant dissous en quantité quelconque dans l'eau n'augmentent pas sa faculté conductrice.

Il résulte de ce tableau que la conductibilité des acides est inférieure à celle des sels renfermant les mêmes acides, résultats opposés à ceux obtenus par Marianini, mais qui, d'après le mode d'expérience, sont compliqués des effets résultants de la force électro-motrice ou de l'action chimique.

1192. En augmentant la quantité de sel dissous, M. Matteucci a reconnu 1° qu'avec le chlorure de potassium le maximum a lieu à 4/100, et que la conductibilité reste constante jusqu'à la saturation; 2° qu'avec le chlorure de sodium le maximum de conductibilité a lieu à 1/100; qu'elle reste constante jusqu'à 4/100, et diminue de 1/5 jusqu'à la saturation; 3° qu'avec l'acétate de plomb le maximum a lieu à 4/100, et diminue jusqu'à la saturation, où elle est la même qu'à 1/200; 4° qu'avec le nitrate d'argent le maximum a lieu à 2/100 jusqu'à 4/100; 5° que l'acide sulfurique se comporte de la même manière.

Lorsqu'une dissolution a atteint son maximum, l'addition d'un autre sel augmente la conductibilité comme si le premier sel n'existait pas, à moins qu'il n'y ait précipitation d'un sel insoluble. Le chlorure d'iode, le proto-chlorure d'etain, et le chlorure de cuivre, ajoutés en quantités convenables à une dissolution de chlorure de sodium, ont offert une conductibilité presque métallique.

Digitized by Google

Le même physicien a aussi reconnu que la chaleur augmente la conductibilité des dissolutions salines, mais d'autant moins que la conductibilité est plus grande; pour l'eau distillée, la température variant de 8° à 80°, la déviation a varié de 4° à 27°; pour l'eau de puits une variation de 5° à 80° a fait varier la déviation de 4° à 41°; pour l'eau saturée de sel marin une variation de température de 7° à 85° a fait varier la déviation de 7° à 35°; et enfin, pour le nitrate d'argent une variation de 22° à 45° a produit une variation de déviation de 73° à 89°.

Il faut bien remarquer que toutes les expériences que nous venons de rapporter ne peuvent conduire qu'à reconnaître le sens de la variation de la conductibilité dans les différents cas, et non pas le rapport des conductibilités. Les résultats sont d'ailleurs compliqués de la résistance que le courant éprouve à passer du métal dans le liquide et du liquide dans le métal, résistance qui n'est très-probablement pas la même pour les différents liquides, et qui même pour chacun d'eux varie peut-être aussi avec l'intensité du courant. C'est probablement par cette raison que plusieurs des résultats obtenus par M. Matteucci ne s'accordent pas avec ceux obtenus par d'autres physiciens.

D'après M. Pouillet, la conductibilité du platine est 2546680 fois plus grande que celle d'une dissolution saturée de sulfate de cuivre; la conductibilité de la dissolution diminue à mesure qu'on y ajoute de l'eau, mais suivant une loi qui n'est pas très-rapide; en ajoutant 4 fois son volume d'eau, sa conductibilité passe de 1 à 0,31.

1193. Un milieu composé de deux liquides séparés par une membrane animale possède une conductibilité très-différente, suivant le sens du courant; pour l'eau, et l'eau contenant quelques gouttes de chlorure d'iode, le courant entrant par ce dernier liquide produit une déviation 6 fois plus forte que quand il entre par l'eau pure (Matteucci).

1194. Un courant d'induction se transmet plus facilement d'un liquide à un autre, lorsque, l'arc métallique de cuivre, de fer ou de zinc qui réunit les deux liquides étant terminé par une pointe d'un côté et par une plaque de l'autre, le courant passe du premier liquide dans la lame, et de la pointe dans le deuxième liquide. Le platine agit en sens contraire (Marianini, Botto, de Larive).

§ XIII. *Considérations générales sur l'électricité dynamique.*

1195. Dans la longue série de faits que présente l'électricité dynamique, nous avons vu les courants agir les uns sur les autres, suivant des lois qui diffèrent complétement des lois des attractions et des répulsions de l'électricité en repos; les courants produire l'aimantation, les aimants produire des courants; la chaleur et les actions chimiques être tantôt des causes de production des courants, tantôt des effets produits par les courants. Ainsi, l'électricité est un agent puissant de la nature, et qui est intimement lié au principe de la chaleur, du magnétisme, et à la constitution même des corps; et il est évident que nous ne pourrons découvrir la nature de ce principe et sa manière d'agir sans connaître et la nature du principe de la chaleur et le mode de constitution des corps.

Cependant, Davy, Berzélius, Ampère, Faraday, Becquerel et de Larive ont émis des hypothèses plus ou moins plausibles pour expliquer les phénomènes électriques et chimiques qui se développent dans le contact des corps; mais ces hypothèses, toutes obscures et incomplètes, ne peuvent être considérées que comme des essais, dont la discussion peut faire partie d'un ouvrage spécial sur l'électricité, mais qui ne peut entrer dans le cadre d'un traité élémentaire de physique, d'autant plus qu'aucune de ces hypothèses n'est généralement admise.

Digitized by Google

1196. Il y a cependant un point sur lequel les physiciens sont partagés, et que nous ne devons pas passer sous silence, je veux parler de la théorie de Volta. Volta, comme nous l'avons vu, a prétendu que la source de l'électricité résidait dans le contact. Nous avons déjà dit que sa théorie de la pile devait être rejetée, attendu que les liquides ne jouent pas seulement le rôle de conducteurs, mais qu'ils interviennent directement dans les effets produits, puisqu'en changeant la nature du liquide on pouvait changer la nature des pôles de la pile : dans une pile formée d'éléments fer et cuivre, les pôles sont intervertis quand elle est montée avec de l'eau acidulée ou avec une dissolution de sulfure de potassium. Mais la théorie de Volta, restreinte au fait du développement de l'électricité par le contact, n'est point admise par tous les physiciens. Plusieurs soutiennent que l'effet provient non du contact, mais de l'action chimique développée.

Nous avons décrit précédemment les expériences sur lesquelles Volta avait fondé sa théorie (1020), et nous avons dit que tous les physiciens qui avaient répété ces expériences n'avaient pas obtenu les mêmes résultats. Dès l'origine de la découverte de Volta, plusieurs physiciens, entre autres Ritter, avaient pensé que l'effet de la pile était dû à une action chimique. Récemment M. de Larive, à qui l'électricité dynamique doit tant d'observations remarquables, a appuyé cette opinion par des expériences nombreuses d'où semble résulter que, dans les expériences de Volta, l'électricité accumulée dans le condensateur provient de l'action chimique exercée sur le zinc par l'air humide ou par la main ; que, quand on se met à l'abri de toutes les causes qui peuvent produire l'oxydation, il n'y a point d'électricité dégagée. Mais M. Pfaff a reproduit les expériences de Volta dans des circonstances qui semblent, au contraire, ne laisser aucun doute sur le fait avancé par ce célèbre physicien. Les disques du condensateur étaient l'un en zinc et l'autre en laiton, couverts d'une couche mince de vernis à la gomme laque : en établissant un contact entre eux par un fil métallique quelconque, et les séparant ensuite, il obtint toujours les résultats annoncés par Volta et la même déviation, que l'appareil fût placé dans l'air sec ou humide, dans le gaz oxygène, l'azote, l'acide carbonique, l'hydrogène, ou l'hydrogène carboné secs. Depuis, M. Peltier a fait de nouvelles expériences qui confirment également le fait avancé par Volta.

M. de Larive a répondu qu'il était impossible de s'assurer que dans l'expérience de M. Pfaff, les gaz ne conservaient aucune trace d'humidité, et que la plus petite quantité d'humidité pouvait produire une action chimique suffisante à la production de l'électricité observée ; mais alors on ne comprend plus comment il se fait que tous les gaz agissent de la même manière, ni pourquoi, en remplaçant des disques de cuivre, par d'autres de plomb, d'étain, etc., on obtienne des déviations différentes. M. de Larive pense qu'une couche mince de vernis n'empêche par l'action chimique : car, en augmentant le nombre des couches qui recouvrent les surfaces extérieures de deux disques de zinc et de cuivre en contact, sans augmenter celles des surfaces voisines, l'effet électrique diminue, et finit par devenir nul.

La difficulté que présente la question dont il s'agit tient évidemment à la faible quantité d'électricité qui se produit dans le contact des métaux, si toutefois cette production existe, et à la grande quantité d'électricité qui résulte de la plus faible action chimique.

M. de Larive, à la suite de nombreuses expériences, a en outre constaté que toutes les circonstances qui favorisent l'action chimique augmentent la quantité de l'électricité développée, et que, dans un circuit formé de deux métaux et d'un liquide, le métal le plus attaqué prend toujours au liquide l'électricité négative.

L'hypothèse purement chimique de l'origine de l'électricité voltaïque présente

Digitized by Google

cependant dans beaucoup de cas de grandes difficultés; nous en citerons quelques-unes. M. Becquerel a reconnu que, si l'on fixe à l'extrémité du fil d'un multiplicateur un cristal de peroxyde de manganèse et à l'autre extrémité un fil de platine, en plongeant le fil de platine et le cristal dans l'eau pure, il se produit un courant; le cristal prend à l'eau l'électricité positive; mais le courant est instantané. Lorsqu'on interrompt le circuit pendant plus de 5 minutes, le platine et le peroxyde restant plongés dans l'eau, il se produit un courant d'autant plus intense que le circuit est resté ouvert plus longtemps; enfin, lorsqu'un cristal de peroxyde de manganèse est plongé à moitié dans l'eau, la partie la plus rapprochée de la surface immergée est négative, et la partie la plus éloignée est positive. On ne voit dans ces phénomènes aucune action chimique qui puisse produire les courants observés. Il en est de même d'un couple de zinc et cuivre entièrement plongé dans une dissolution neutre de sulfate de zinc, et cependant il se produit un courant très-énergique. Les piles formées de cuivre et de zinc amalgamé présentent la même difficulté. Tant que le circuit n'est pas fermé, le zinc n'est pas attaqué : quelle est alors la circonstance qui détermine le sens du courant quand les pôles sont mis en communication? A la vérité, d'après M. Daniell, le zinc amalgamé est attaqué au commencement de l'immersion, mais sa surface se couvre de nombreuses bulles d'hydrogène qui empêchent l'action chimique de se continuer. Cette circonstance ne détruit pas l'objection : car, que le zinc soit préservé de l'action chimique par du mercure ou de l'hydrogène, peu importe, il n'en faut pas moins une cause pour déterminer le sens du courant quand on ferme le circuit, et cette cause ne peut pas résider dans l'action chimique, puisqu'elle n'existe pas.

De tout cela il faut conclure que la nécessité d'une action chimique dans le développement de l'électricité voltaïque n'est point démontrée. A la vérité, dans un grand nombre de cas, la quantité d'électricité développée est beaucoup plus grande quand il y a action chimique évidente que quand elle n'existe pas ou qu'elle est difficile à constater; mais il existe aussi beaucoup de cas de développement d'électricité dans lesquels il est bien difficile d'admettre une action chimique. Si on considère que dans tous les cas possibles il y a toujours contact; que souvent même le contact précède l'action chimique, on est conduit à regarder comme bien probable que c'est dans le contact que réside la cause du développement de l'électricité, et que c'est ce développement lui-même qui est la cause des actions chimiques. Au reste, les deux hypothèses du contact et de l'action chimique sont aussi obscures l'une que l'autre, car nous n'avons pas d'idée plus nette sur la force électro-motrice que sur l'action chimique.

1197. Les considérations théoriques admises par M. de Larive l'ont conduit à une explication très-probable des effets de la pile; cette explication, fondée en apparence sur l'hypothèse que l'action chimique est l'origine de l'électricité, est au fond indépendante de la cause supposée à l'électricité développée sur les faces des éléments. Voici en quoi elle consiste.

Considérons d'abord une plaque de zinc plongée dans l'eau acidulée : par suite de l'action chimique exercée sur la plaque métallique, le zinc prend l'électricité négative et le liquide l'électricité positive; mais ces électricités se recombinent à travers le liquide, de sorte qu'un électroscope mis en contact avec la plaque de zinc ou le liquide, ne se chargerait pas, ou du moins très-peu. Mais si on plonge dans le même liquide une plaque de cuivre et si on la met en contact avec la plaque de zinc par un fil métallique, les électricités développées sur le zinc et dans le liquide pourront se rejoindre par deux chemins, à travers le liquide, ou en parcourant le conducteur de cuivre; une partie seulement de l'électricité suivra ce dernier chemin et produira un courant dans le conducteur. Ainsi le courant augmentera avec l'étendue et le rap-

Digitized by Google

prochement de la plaque de cuivre et la conductibilité du conducteur. Considérons maintenant une pile dont tous les éléments sont égaux, par exemple une pile à auge : il est facile de voir que des quantités égales d'électricités contraires et opposées se neutraliseront dans chaque auge ; que les auges extrêmes renfermeront des quantités d'électricité égales et opposées, et qui seront indépendantes du nombre des éléments. Si le circuit est fermé par un fil métallique court et d'un diamètre suffisant, le courant aura une intensité aussi indépendante du nombre des éléments. Si la pile est isolée, il semble que les quantités d'électricité en s'accumulant constamment aux pôles devront prendre une tension qui croîtra indéfiniment ; mais il faut remarquer que ces électricités libres peuvent se combiner à travers la pile elle-même, et que la tension ne pourra pas dépasser une certaine limite qui existera quand la quantité d'électricité développée dans un temps donné par un des couples extrêmes sera égale à celles qui se combinent à travers la pile par des courants dirigés des extrémités au centre ; mais il est démontré que la conductibilité d'une masse liquide diminue à mesure que l'on augmente le nombre des diaphragmes métalliques interposés : ainsi la tension augmentera avec le nombre des éléments.

Cette explication des effets de la pile serait évidemment la même dans l'hypothèse où l'électricité serait développée par le contact des métaux entre eux et avec les liquides.

§ XIV. *Poissons électriques.*

1198. On connaît trois espèces des poissons que jouissent de la propriété singulière de donner des commotions quand on les touche dans certaines parties en les irritant : ce sont le *gymnote,* la *torpille* et le *silure*. Tous sont dépourvus d'écailles ; le plus grand est le gymnote ; M. de Humbolt en a vu de cinq pieds trois pouces de longueur. La torpille est une espèce de raie, assez abondante dans la Méditerranée, et sur les bords de l'Océan, où il existe des bas-fonds marécageux ; sa longueur varie ordinairement de six pouces à un pied.

1199. Lorsqu'on touche l'animal directement, ou avec un corps bon conducteur de l'électricité, et qu'il est irrité, on éprouve une commotion semblable à celle qui résulte de la décharge d'une bouteille de Leyde ; en le touchant avec un corps mauvais conducteur on n'éprouve rien ; lorsque deux personnes se tiennent par la main, et que l'une d'elles seulement touche l'animal, toutes deux reçoivent la commotion. D'après Valsh, vingt personnes qui se tenaient par la main, et dont les deux placées aux extrémités touchaient, l'une le dos, l'autre le ventre d'une torpille, éprouvèrent toutes la commotion. Quand l'animal est vigoureux, il agit de la même manière qu'il soit plongé dans l'eau ou dans l'air ; dans l'eau il lance à distance des décharges qui tuent ou du moins engourdissent les animaux dont il veut faire sa proie.

1200. Ces commotions sont souvent très-fortes : M. de Humbolt affirme n'avoir jamais reçu par la décharge d'une grande bouteille de Leyde une commotion plus effrayante que celle qu'il ressentit en plaçant imprudemment ses deux pieds sur un gymnote qu'on venait de retirer de l'eau ; il fut affecté le reste du jour d'une violente douleur dans les genoux et presque dans toutes les jointures.

Pour donner une idée plus exacte de la puissance des décharges électriques de ces animaux, nous rapporterons un passage de M. de Humbolt sur la pêche du gymnote :

« Nous partîmes le 9 mars de grand matin pour le petit village de *Rastro de Abaso ;* de là les Indiens nous conduisirent à un ruisseau qui, dans le temps des sécheresses, forme un bassin d'eau bourbeuse, entouré de beaux arbres. Les Indiens

Digitized by Google

nous dirent qu'ils allaient pêcher avec des chevaux; et bientôt nous vîmes nos guides revenir de la savane, où ils avaient fait une battue de chevaux et de mulets non domptés; ils en amenèrent une trentaine, qu'on força d'entrer dans la mare.

» Le bruit extraordinaire causé par le piétinement des chevaux fait sortir les poissons de la vase et les excite au combat. Ces anguilles, jaunâtres et livides, semblables à de grands serpents aquatiques, nagent à la surface de l'eau, et se pressent sous le ventre des chevaux et des mulets. Une lutte entre des animaux d'une organisation si différente offre le spectacle le plus pittoresque. Les Indiens, armés de harpons et de roseaux longs et minces, ceignent étroitement la mare; quelques-uns d'entre eux montent sur les arbres dont les branches s'étendent horizontalement au-dessus de la surface de l'eau; par leurs cris sauvages et la longueur de leurs joncs ils empêchent les chevaux de se sauver en atteignant la rive du bassin. Les anguilles, étourdies du bruit, se défendent par la décharge réitérée de leurs batteries électriques; pendant longtemps elles ont l'air de remporter la victoire. Plusieurs chevaux succombent à la violence des coups invisibles qu'ils reçoivent de toutes parts dans les organes les plus essentiels à la vie; étourdis par la force et la fréquence des commotions, ils disparaissent sous l'eau. D'autres, haletant, la crinière hérissée, les yeux hagards et exprimant l'angoisse, se relèvent et cherchent à fuir l'orage qui les surprend: ils sont repoussés par les Indiens au milieu de l'eau. Cependant un petit nombre parvient à tromper l'active vigilance des pêcheurs; on les voit gagner la rive, broncher à chaque pas, s'étendre dans le sable, excédés de fatigue et les membres engourdis par les commotions électriques des gymnotes: en moins de cinq minutes deux chevaux s'étaient noyés.

» Nous ne doutions pas que la pêche ne se terminât par la mort successive des animaux qu'on y emploie; mais peu à peu l'impétuosité de ce combat inégal diminue; les gymnotes, fatigués, se dispersent; ils ont besoin d'un long repos et d'une nourriture abondante pour réparer ce qu'ils ont perdu de force galvanique. Les mulets et les chevaux parurent moins effrayés; ils ne hérissaient plus la crinière, leurs yeux exprimaient moins d'épouvante. Les gymnotes s'approchaient timidement des bords du marais, où on les prit au moyen de petits harpons attachés à de longues cordes.»

1201. Les décharges des poissons électriques dépendent de leur volonté. L'électricité dans ces animaux paraît se produire dans des organes particuliers formés d'une infinité de petits tubes réunis, comme les alvéoles des abeilles. Ces appareils électriques sont placés, dans la torpille, de chaque côté de la tête; dans le gymnote, sous la queue, et dans le silure, autour du corps.

1202. La torpille a été beaucoup plus observée que les autres poissons électriques. Voici les principaux faits constatés par divers physiciens. MM. Gay-Lussac et de Humbolt ont reconnu qu'une personne isolée ne ressent la commotion qu'autant que le contact avec le doigt est immédiat; elle n'a pas lieu par l'intermédiaire d'un corps métallique. Ils n'ont pu reconnaître aucun effet de tension électrique à l'instant où la torpille donne la commotion. Davy, en mettant des plaques de cuivre en contact, l'une avec la partie supérieure du corps, l'autre avec la partie inférieure, et communiquant entre elles par un long fil de cuivre tourné en hélice autour d'un tube de verre, est parvenu à aimanter des aiguilles d'acier; il obtint de la même manière la déviation de l'aiguille d'un multiplicateur; il parvint aussi à produire de faibles actions chimiques; mais ces résultats pouvaient être compliqués de l'inégalité des actions développées au contact des lames de cuivre et de la peau de l'animal. Les tentatives faites dans le but d'obtenir des effets d'ignition ou des étincelles ont été infructueuses. Récemment MM. Becquerel et Breschet ont reconnu que la commotion a lieu quand l'animal est irrité, quel que soit le point touché, pourvu qu'il ne soit

Digitized by Google

pas sur la queue, et qu'elle est d'autant plus grande que la surface du contact est plus étendue. En mettant en contact avec le dos et le ventre d'une torpille deux plaques de platine, soutenues par des manches isolants, et soudées chacune avec un fil de platine, dont l'un communique avec un multiplicateur à fil long et verni, et l'autre avec un vase plein d'eau pure, en rapport avec l'autre extrémité du multiplicateur, on a obtenu des déviations de l'aiguille comprises entre 5° et 40°. Les plaques en contact avec l'animal étaient en platine pour éviter les effets qui pourraient provenir d'une action chimique si on employait des métaux oxydables, et on avait placé de l'eau dans le circuit pour intercepter les courants thermo-électriques s'il s'en développait. En remplaçant le multiplicateur par une spirale on a aimanté des aiguilles : le courant était toujours dirigé du dos au ventre. Enfin, plus récemment encore, MM. Linari et Matteucci sont parvenus à obtenir des étincelles et des décompositions chimiques en employant un fil très-long (300^{m}) tourné en hélice autour d'un morceau de fer, établissant les communications entre le dos et le ventre par de larges plaques métalliques, et plaçant dans le circuit un petit godet plein de mercure. Une grenouille récemment préparée et placée sur le poisson indiquait par ses mouvements les époques des décharges, et en enlevant à cet instant un des fils qui plongeaient dans le mercure, et le replongeant immédiatement, on obtenait des étincelles et la décomposition de l'eau acidulée. Ces physiciens ont trouvé, comme MM. Becquerel et Breschet, que le courant va du dos au ventre. Les mêmes physiciens ont fait une expérience qui démontre avec la dernière évidence l'influence du cerveau sur les décharges. Lorsqu'une torpille ne donne plus de décharges malgré l'irritation, si on met le cerveau à découvert et si on touche légèrement le dernier lobe, celui qui donne les nerfs à l'organe électrique, on obtient des décharges beaucoup plus fortes qu'à l'ordinaire; si on blesse le cerveau, on obtient encore des décharges très-fortes, mais dans lesquelles le courant n'a pas toujours la direction du dos au ventre.

1203. D'après ces dernières observations, on conçoit facilement l'origine de la commotion qu'on éprouve quand on touche le dos de la torpille avec une main et le ventre avec l'autre; mais quand on ne touche l'animal qu'avec une main, l'explication de la commotion paraît assez difficile. M. Becquerel admet que l'animal par sa volonté dirige la décharge au point où il est irrité, et qu'une partie des deux électricités se recombine à travers les organes; mais l'influence singulière de l'interposition d'une plaque métallique suivant que le corps est ou n'est pas isolé paraît difficile à comprendre.

CHAPITRE VI.

DE LA LUMIÈRE.

1204. Plusieurs systèmes ont été émis sur la nature de la lumière: Descartes supposait que l'univers est rempli d'un fluide extrêmement subtil et élastique, désigné sous le nom d'*éther*, et que les corps lumineux éprouvent des vibrations qui se propagent à travers l'éther comme les ondes sonores à travers l'air : Newton admettait, au contraire, que la lumière est due à une émission de particules que les corps lumineux

Digitized by Google

lancent continuellement dans toutes les directions. Nous décrirons d'abord les phénomènes que présente la lumière, sans admettre aucune hypothèse sur sa nature, et nous examinerons ensuite ces deux systèmes, entre lesquels les physiciens sont encore partagés.

§ I. *Phénomènes généraux.*

Transmission.

1205. *Dans un milieu homogène la lumière se transmet en ligne droite.* En effet, si on fait pénétrer un petit faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure, la poussière en suspension dans l'air étant éclairée laisse apercevoir la route de la lumière, et on reconnaît facilement qu'elle est rectiligne. Si on interpose un corps opaque sur la ligne droite qui joint l'œil avec le corps lumineux, la lumière est interceptée. Si le milieu n'était pas homogène, et si la lumière le traversait dans une direction oblique aux surfaces de séparation des parties homogènes, nous verrons bientôt que le rayon changerait de direction à chaque passage d'une partie homogène dans la suivante, et que, s'il y avait continuité dans les changements de densité, la lumière parcourrait une ligne courbe : c'est ce qui arrive, par exemple, pour tous les rayons de lumière qui nous arrivent à travers l'atmosphère dans une direction inclinée à la verticale. Nous verrons aussi, en parlant de la diffraction, que la lumière qui rase les bords des corps, et celle qui passe par des orifices très-étroits, ne se propagent pas non plus en ligne droite.

1206. *L'intensité de la lumière est en raison inverse du carré de la distance au point lumineux, quand il n'y a point de lumière absorbée par le seul fait de la transmission.* En effet, si on conçoit deux sphères de rayons différents décrites autour d'un point lumineux, chacune recevra toute la lumière émanée du point lumineux; et une même étendue prise sur chacune d'elles recevra une quantité de lumière en raison inverse de l'étendue de la surface de la sphère sur laquelle elle est placée, c'est-à-dire en raison inverse du carré de la distance au point lumineux.

La loi précédente n'est exacte que quand la lumière se meut dans le vide : car, lorsqu'elle passe à travers des milieux diaphanes, gazeux, liquides ou solides, une partie plus ou moins grande est absorbée, et alors l'intensité de la lumière décroît suivant une loi plus rapide; cependant on peut la regarder comme vraie dans l'air, lorsque les distances sont petites et peu différentes. Il résulte de la loi de propagation de la lumière que l'éclat d'un corps est indépendant de sa distance à l'œil, car son étendue apparente varie avec la distance dans le même rapport que l'intensité des rayons.

1207. *Mesure de l'intensité de deux lumières.* Pour estimer le rapport des intensités de deux lumières, on place un corps opaque en avant d'un carton blanc éclairé par les deux lumières : chacune d'elles projette une ombre du corps sur le carton, et chaque ombre est éclairée par l'autre lumière; on change les distances relatives des deux lumières jusqu'à ce que les ombres aient la même intensité, alors les intensités des deux lumières sont évidemment en raison directe des carrés de leurs distances aux ombres qu'elles éclairent. Il faut avoir soin de placer le corps opaque très-près de l'écran, afin que les pénombres aient peu d'étendue; et il faut rapprocher les ombres de manière à les rendre presque tangentes. Quand les lumières ont la même teinte, on apprécie avec une très-grande justesse l'égalité des ombres; mais, quand les lumières ont des teintes différentes, cette différence existe aussi dans les ombres, et il est alors beaucoup plus difficile de juger de leur intensité.

On peut employer cette méthode pour vérifier la loi de la propagation. On place

Digitized by Google

des bougies les unes derrière les autres, de manière à former deux groupes dont les flammes, dans chacun, soient très-voisines, à la même hauteur, et placées dans un même plan avec le corps qui doit porter l'ombre sur l'écran : en disposant les groupes de manière que les ombres soient égales, on trouve que les carrés de leurs distances aux centres des groupes sont sensiblement proportionnels au nombre de bougies qu'ils contiennent. L'expérience ne pourrait pas être faite avec des chandelles, parce que l'intensité de leur lumière est trop variable.

1208. *Photomètre de M. Leslie.* Cet instrument, destiné, comme son nom l'indique, à mesurer l'intensité des lumières, est une modification du thermomètre différentiel; il est fondé sur l'hypothèse que l'intensité de la lumière est proportionnelle à la température qui l'accompagne. Cette hypothèse n'est point exacte en général, mais il paraît que pour la lumière solaire et celle du ciel elle n'est point en opposition avec les faits. Le photomètre ne diffère du thermomètre différentiel qu'en ce qu'une des boules est en verre noir, l'autre étant toujours de verre transparent : en exposant l'instrument à la lumière, son intensité est mesurée par l'élévation du liquide. Pour éviter l'influence des mouvements de l'air, M. Leslie renferme l'instrument dans une petite cloche de verre (*fig.* 719); il lui donne aussi la forme *fig.* 720. L'instrument, placé en plein air, monte à mesure que le soleil s'élève sur l'horizon, et descend depuis cet instant jusqu'à ce que l'obscurité soit complète. A la même époque de la journée il monte depuis le solstice d'hiver jusqu'à l'époque la plus chaude de l'année, et décroît depuis cette époque jusqu'en hiver.

1209. M. Leslie a employé cet instrument à la comparaison des intensités de deux lumières. Pour cela il place les corps lumineux à des distances de la boule noircie telles, que de ce point les corps soient vus sous le même diamètre apparent; alors les intensités des deux lumières sont proportionnelles aux effets thermométriques : car, si différentes sections d'un même cône sont également lumineuses, elles enverront des quantités égales de lumière au sommet, et, dans le cas contraire, des quantités proportionnelles à l'intensité de leur éclat. M. Leslie a trouvé par cette méthode que la lumière du soleil était égale à 12000 bougies. Bouguer, en comparant l'intensité de la lumière d'une bougie, dont il faisait varier la distance, à l'intensité de la lumière solaire qui pénétrait dans une chambre obscure (1207), après avoir été atténuée dans une proportion connue en traversant une lentille divergente, avait trouvé que la lumière solaire était équivalente à 30000 bougies.

Le rapport de l'intensité de la lumière du soleil à celle de la lune a été trouvé égal à 94500 par Leslie, à 256289 par Bouguer, à 800000 par Wollaston. La grande différence de ces résultats dépend et de l'inexactitude des moyens employés, et de la hauteur des astres au-dessus de l'horizon, et de l'état de l'atmosphère.

1210. *Vitesse de la lumière.* La vitesse de la lumière étant très-grande, on ne peut pas l'observer à la surface de la terre, parce que les distances y sont trop petites; la détermination de cette vitesse ne peut se faire que par des observations astronomiques. Jupiter est accompagné de plusieurs satellites qui circulent autour de lui; le premier effectue sa rotation dans 42 heures 1/2 : par conséquent, si on observe l'instant où il s'éclipse en entrant dans le cône d'ombre que Jupiter projette derrière lui, l'instant de l'immersion apparente aura lieu après celui de l'immersion réelle, de tout le temps que la lumière met à parcourir la distance qui sépare Jupiter de la terre; si cette distance était constante, les éclipses se succéderaient à des intervalles exacts de 42 heures 1/2. Mais, si la première observation a eu lieu lorsque la terre était au point de son orbite le plus rapproché de la planète, et la dernière lorsqu'elle en est le plus éloignée, on trouve que l'intervalle entre la première et la dernière observation ne renferme pas un nombre exact de fois 42 heures 1/2; il y a un excédant de

Digitized by Google

16′ 26″ : or cet excédant ne peut provenir que des retards qui se sont accumulés à mesure que la terre s'éloignait de Jupiter, et il est évidemment égal au temps que la lumière a mis à parcourir le diamètre de l'orbite terrestre. En observant la dernière éclipse lorsque la terre ne s'est éloignée que d'une partie du diamètre de son orbite, on trouve que le temps employé par la lumière pour parcourir cet espace est la même fraction du temps qu'elle met à parcourir le diamètre total : par conséquent, la vitesse de la lumière est constante. Comme le diamètre parcouru dans 16′ 26″ est de 68 à 69 millions de lieues, la vitesse de la lumière est d'environ 70000 lieues par seconde. Ce qui précède suppose nécessairement que la planète est immobile, ou du moins que son mouvement est peu considérable pendant une demi-année ; c'est en effet ce qui existe, car Jupiter met à peu près douze années à parcourir son orbite ainsi il n'en décrit que le vingt-quatrième pendant que la terre passe d'une extrémité à l'autre du diamètre de son orbite.

1211. Nous verrons plus tard que la lumière blanche est formée de lumières de toutes les couleurs ; alors on pourrait se demander si les rayons de différentes teintes ont la même vitesse ; l'observation suivante prouve avec la dernière évidence qu'il en est ainsi. Quand les satellites de Jupiter passent devant cette planète, ils projettent sur son disque une ombre qui marche avec le satellite : or, si les rayons de différentes couleurs allaient inégalement vite, l'ombre laisserait après elle des traces colorées, et il n'en est pas ainsi.

Pour comprendre l'énormité de la vitesse de la lumière, il faut la comparer à celles que nous regardons comme très-grandes. Un boulet de canon emploierait plus de 17 ans pour atteindre le soleil, en lui supposant pendant toute sa course la vitesse dont il était animé au moment de la décharge ; et cependant la lumière parcourt le même espace en 8 minutes et demie. L'oiseau dont le vol est le plus rapide mettrait près de 3 semaines à faire le tour du globe, tandis que la lumière franchit le même espace en beaucoup moins de temps qu'il n'en faut à l'oiseau pour faire un simple battement d'ailes.

1212. Le défaut d'instantanéité dans la transmission de la lumière donne naissance à un phénomène fort remarquable que nous devons indiquer. Lorsqu'un rayon de lumière émané d'un astre quelconque vient frapper l'œil d'un observateur, si l'observateur est immobile il voit l'astre dans la direction du rayon qu'il en reçoit; mais s'il est en mouvement il voit l'astre dans la direction de la diagonale du parallélogramme formé sur deux lignes, dont l'une représente la vitesse de la lumière, et l'autre la sienne propre. Il résulte de là que le lieu apparent des astres diffère du lieu vrai ; que la grandeur de l'écart dépend du rapport de la vitesse de la lumière à celle de l'observateur, et de la direction de ces vitesses. Des deux mouvements de la terre il n'en est qu'un seul dont la vitesse soit comparable à celle de la lumière, et qui ait une influence sensible, c'est le mouvement dans l'écliptique. Ce phénomène, découvert par Bradley, porte le nom d'*aberration*. C'est en vertu de l'aberration que les étoiles fixes paraissent décrire chaque année, dans le ciel, de petites ellipses. Dans le calcul de l'aberration, après avoir corrigé les observations de l'influence de la réfraction atmosphérique, il faut avoir égard non-seulement à la vitesse de la lumière, à celle de la terre, mais encore à la vitesse de translation de l'astre quand sa vitesse est comparable à celle de la lumière.

1213. *Ombre.* Considérons un point lumineux éclairant et un corps opaque quelconque ; par le point lumineux comme sommet (*fig.* 721) concevons un cône qui enveloppe et touche le corps, la ligne de contact sépare évidemment la partie du corps qui reçoit de la lumière de celle qui n'en reçoit pas ; le cône au delà du corps renferme un espace dans lequel la lumière ne pénètre pas : cet espace forme l'ombre du corps.

Digitized by Google

1214. *Pénombre.* Lorsqu'un corps lumineux a des dimensions finies, la séparation de l'ombre et de la lumière sur un corps quelconque qu'il éclaire n'a pas lieu brusquement. Supposons, par exemple, que le corps lumineux soit une sphère *A* (*fig.* 722), et le corps éclairé une sphère *B;* menons les deux cônes tangents aux deux sphères, et soient *ab* et *cd* les deux cercles de contact : il est évident que tous les points de la sphère *B* situés en avant de *ab* recevront la plus grande quantité de lumière; que tous les points de la sphère *B* situés derrière le cercle *cd* ne recevront aucun rayon lumineux; et que les points situés entre les cercles *ab* et *cd* recevront une quantité de lumière décroissante à mesure qu'ils s'approcheront davantage de *cd.* L'intervalle compris entre *ab* et *cd,* dans lequel a lieu la dégradation de la lumière, a reçu le nom de *pénombre.* L'espace situé derrière la sphère *B* est aussi composé d'un espace *O* où la lumière ne pénètre pas, qui est infini quand le corps opaque est plus grand que le corps lumineux, et fini (*fig.* 723) dans le cas contraire. Cet espace est environné d'un autre, *N,* qui n'est éclairé que par une partie du corps lumineux, et qui est infini dans tous les cas.

Cette détermination géométrique de l'ombre et de la pénombre projetées derrière un corps n'est pas cependant rigoureusement exacte, parce que les rayons de lumière s'infléchissent en passant contre les corps; mais comme cette inflexion est très-faible, l'ombre réelle diffère peu de celle qui résulte de la construction géométrique dont nous venons de parler, excepté pourtant dans quelques circonstances particulières, dont il ne sera question qu'en parlant de la diffraction.

1215. Il résulte de ce qui précède que, si on perçait une ouverture d'une forme quelconque dans un écran éclairé par un seul point lumineux, le faisceau de lumière projeté derrière l'ouverture serait un cône ayant pour base l'orifice, et pour sommet le point lumineux : par conséquent, si on plaçait un écran derrière l'orifice, la partie éclairée aurait la forme de l'orifice; mais si le corps lumineux avait des dimensions finies, l'image reçue sur l'écran aurait la forme du corps lumineux, quelle que fût d'ailleurs celle de l'orifice, pourvu que l'écran en fût suffisamment éloigné. En effet, pour avoir l'image formée sur l'écran, il faut, par un point quelconque de la circonférence du corps lumineux, et par l'orifice, mener un cône, et faire promener le sommet de ce cône sur toute la circonférence du corps lumineux : on voit alors facilement que la surface qui résulte de ce mouvement est une espèce de cône à deux nappes, ayant pour sommet l'orifice, et dans lequel les sections perpendiculaires à l'axe s'approchent d'autant plus de celle du corps lumineux qu'elles sont plus éloignées de l'orifice. C'est ainsi que les rayons du soleil qui passent à travers les intervalles des feuilles forment sur le sol des images circulaires ou elliptiques, suivant l'inclinaison des rayons, et que durant les éclipses les parties éclairées ont la forme apparente du soleil.

1216. *L'intensité de la lumière émise par un même corps est proportionnelle au sinus de son inclinaison sur la surface.* Une surface lumineuse paraît également brillante, quelle que soit l'inclinaison sous laquelle elle se présente. Il faut nécessairement conclure de là que le rapprochement des rayons, lorsque la surface est oblique, se trouve compensé par la diminution de leur intensité. On trouve, par le même raisonnement que pour la chaleur (486), l'intensité doit varier proportionnellement au sinus de l'angle avec la surface. Il résulte de là, et de la loi du décroissement d'intensité de la lumière en raison de la distance (1206), qu'un corps lumineux conserve toujours le même éclat, quelles que soient sa distance à l'œil et sa position.

On désigne sous le nom de *corps opaques* ceux qui ne peuvent point être traversés par la lumière : sous celui de *corps transparents* ou *diaphanes* ceux à travers

Digitized by Google

lesquels la lumière peut facilement se propager; et enfin, sous le nom de *corps translucides* ceux qui ne laissent passer que de la lumière diffuse.

Réflexion.

1217. Si on fait pénétrer un rayon solaire dans une chambre obscure, et si, sur son trajet, on place un corps poli, on voit le rayon solaire se briser sur la surface du miroir, et porter contre les parois de la chambre une image du soleil. Lorsqu'un rayon de lumière arrivé sur la surface d'un corps se replie ainsi vers le milieu qu'il avait pénétré d'abord, la déviation qu'il éprouve porte le nom de *réflexion*. On appelle *angle d'incidence* celui du rayon incident avec la normale au point d'incidence, et *angle de réflexion* celui du rayon réfléchi avec la même normale.

1218. *Le rayon incident et le rayon réfléchi sont situés dans un plan normal à la surface réfléchissante au point de réflexion, et l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.* Ces deux lois de la réflexion peuvent être constatées de la manière suivante : on place horizontalement une surface plane et polie, et verticalement un cercle gradué (*fig.* 724); on observe avec la lunette un objet très-éloigné et son image dans le miroir, et on reconnaît que l'objet et l'image sont dans un même plan vertical, et que les directions des rayons incidents et réfléchis sont également inclinées à l'horizon. Par le même mode d'expérience on peut reconnaître que le rayon réfléchi sur une surface courbe a la même direction que si la surface était remplacée par son plan tangent au point de réflexion.

1219. Ces lois de la réflexion de la lumière sont les mêmes que celles de la chaleur. Il est important de remarquer qu'il résulte de ces lois que la lumière, pour passer d'un point du rayon incident à un point du rayon réfléchi, en touchant la surface, parcourt le chemin le plus court. En effet, si des deux points donnés comme foyers on décrit un ellipsoïde de révolution tangent à la surface réfléchissante, les deux rayons vecteurs menés par les points de tangence seront le chemin le plus court de l'un à l'autre foyer en passant par la surface réfléchissante, et ces deux rayons sont précisément disposés comme les rayons incidents et réfléchis.

1220. Il est facile de voir, d'après la loi de la réflexion, que, si un miroir avait la forme d'un ellipsoïde de révolution, et si le point lumineux était placé à l'un des foyers, tous les rayons réfléchis iraient passer par l'autre foyer; que, si le miroir était parabolique et les rayons incidents parallèles à l'axe, les rayons réfléchis passeraient par le foyer, et que, si le point lumineux était au foyer, les rayons réfléchis seraient parallèles à l'axe.

1221. Lorsque les rayons de lumière viennent rencontrer un corps, indépendamment des rayons réfléchis suivant la loi que nous venons d'énoncer, il en existe un nombre plus ou moins grand que la réflexion dissémine dans toutes les directions. Ce sont ces derniers qui rendent le corps visible des points de l'espace où ne passent pas les rayons régulièrement réfléchis. Dans le cas, par exemple, d'un petit miroir placé dans une chambre obscure et frappé par un rayon solaire, si toute la lumière était réfléchie régulièrement, le miroir ne pourrait être aperçu qu'autant que l'œil serait dans la direction du faisceau réfléchi; et encore, dans ce cas, on ne verrait qu'une image du soleil; mais la diffusion des rayons irrégulièrement réfléchis produit le même effet que si le miroir était lumineux par lui-même, et par conséquent on peut l'apercevoir de tous les points de la chambre obscure. Ainsi la réflexion irrégulière qui existe à la surface des corps est une condition nécessaire à leur visibilité: car s'ils ne réfléchissaient que régulièrement la lumière, l'œil, en recevant la lumière de ces corps, n'y verrait que des images des corps qui les éclairent, et nullement

Digitized by Google

leurs images propres, à moins qu'ils ne fussent lumineux par eux-mêmes.

Les quantités de lumière réfléchie régulièrement et irrégulièrement ne sont pas complémentaires, parce qu'il y a toujours une certaine quantité de lumière absorbée par le corps. Cette lumière est éteinte quand le corps est opaque, et ne l'est pas, du moins en totalité, quand le corps est transparent. Cette absorption de la lumière dans la réflexion, et la prodigieuse vitesse de la lumière, expliquent la disparition instantanée de la lumière dans un appartement aussitôt que les rayons directs cessent d'y arriver.

1222. On a reconnu par l'expérience que la quantité de lumière régulièrement réfléchie sur le même corps et sous la même inclinaison augmente avec le poli de sa surface; que les corps sous le même poli et sous la même inclinaison réfléchissent des quantités inégales de lumière; ainsi, le mercure est doué d'un plus grand pouvoir réflecteur que les autres liquides non métalliques; et que, pour le même corps, la quantité de rayons régulièrement réfléchis va en croissant à mesure que les rayons incidents sont plus rapprochés de la surface réfléchissante. On peut mettre ce dernier fait en évidence par une expérience très-curieuse. Si on prend une plaque de verre dépoli, en plaçant l'œil très-près de la surface, de manière à recevoir des rayons réfléchis sous une très-grande incidence, on verra des images aussi nettes que si la glace était polie. La même expérience peut être faite avec une feuille de papier.

D'après Bouguer, l'intensité de la lumière réfléchie sur l'eau de 0°,50 à 90° varie de 18 à 721; le verre et le marbre noir offrent des variations peu différentes. Mais ces grandes variations de pouvoir réflecteur ne se manifestent que dans les corps qui réfléchissent mal la lumière; dans ceux qui ont une grande faculté réfléchissante, comme le mercure et les miroirs de télescope, la variation totale de 0° à 90° n'est guère que de 8 à 9. Le procédé employé par Bouguer pour les corps transparents consistait à placer (*fig.* 725) deux petites plaques égales, et de la même substance, m et n, éclairées par une bougie c, symétriquement à une lame MN à faces parallèles; un écran pq, convenablement disposé, ne permettait à aucun rayon direct de la bougie d'éclairer la plaque MN; l'œil placé en O voyait alors directement la plaque m par transmission et l'autre par réflexion, à la même distance, et l'une au-dessus de l'autre; et on faisait varier la position de la bougie jusqu'à ce que les deux images eussent la même intensité : il est évident qu'en négligeant la quantité de lumière absorbée dans la transmission, l'intensité de la lumière directe était à celle de la lumière réfléchie comme les éclats des plaques n et m, c'est-à-dire en raison inverse des carrés des distances de la bougie à ces plaques. La méthode la plus simple, et qui serait applicable à tous les cas, consisterait dans la disposition photométrique de Bouguer (1207), en se servant de deux bougies donnant des flammes de même intensité, dont la lumière de l'une n'arriverait au corps opaque qu'après s'être réfléchie. La *fig.* 726 représente la disposition de l'appareil : c, c' sont les deux bougies, AB l'écran sur lequel se projettent les ombres du corps opaque o, MN le corps réflecteur, mn et pq des écrans : il est évident que les intensités des rayons directs et réfléchis seront entre elles comme les carrés des chemins parcourus par ces rayons depuis les points c et c' jusqu'aux ombres qu'ils éclairent.

La réflexion de la lumière a non-seulement lieu quand un rayon passe de l'air dans un corps solide ou liquide, opaque ou diaphane, mais généralement toutes les fois qu'un rayon de lumière passe d'un corps dans un autre, quel que soit l'état de chacun d'eux.

1223. *Disposition des rayons réfléchis sur une surface plane.* Soit MN (*fig.* 727) une surface plane, O un point lumineux, OA un rayon incident; pour avoir la direction du rayon réfléchi abaissons du point O une perpendiculaire OX, que nous

Digitized by Google

prolongerons d'une quantité XO' égale à XO; si nous menons $O'A$, je dis que AB, prolongement de $O'A$, sera le rayon réfléchi : en effet, l'angle a est égal à l'angle b, et ce dernier est égal à l'angle c. La même construction étant applicable à tous les autres rayons incidents, il en résulte que tous les rayons réfléchis, étant prolongés au-dessous de MN, vont passer par un point situé derrière le miroir, sur la perpendiculaire abaissée du point lumineux, et à la même distance du miroir que le point lumineux. Il est facile de voir que, si les rayons incidents étaient convergents, les rayons réfléchis passeraient par un point symétrique par rapport au miroir au point de réunion des rayons incidents prolongés : il suffit pour s'en convaincre de supposer dans la *fig.* 728 que les rayons réfléchis sont incidents, et réciproquement.

1224. *Disposition des rayons réfléchis sur un miroir sphérique.* Soit MN (*fig.* 729) un miroir sphérique, O son centre; supposons d'abord que les rayons partent d'un point situé à l'infini, c'est-à-dire qu'ils soient parallèles : en coupant le miroir par des plans méridiens parallèles aux rayons, et traçant dans chacun d'eux des rayons incidents très-voisins, ainsi que les rayons réfléchis correspondants, ces derniers se couperont deux à deux; et, en les supposant consécutifs, la série des points d'intersection formera une courbe XFY, à laquelle tous les rayons réfléchis seront tangents. Cette courbe devant être la même pour tous les plans méridiens, il en résulte que les rayons réfléchis consécutifs se coupent deux à deux sur une surface de révolution autour du rayon de la sphère parallèle à la direction des rayons lumineux, et dont la génératrice est XFY : cette surface s'appelle *caustique*. Chaque point de la caustique, recevant au moins deux rayons lumineux, est plus brillant que l'espace environnant; les rayons réfléchis sur les différents points d'un cercle quelconque situé dans un plan perpendiculaire à l'axe passant tous par un point de l'axe, une partie de cette ligne sera aussi plus lumineuse que les autres points de l'espace, et la lumière se trouvera principalement accumulée au sommet de la caustique, qui se trouve dans la partie brillante de l'axe. Le sommet de la caustique porte le nom de *foyer*. On dit ordinairement que le foyer est le point où passent tous les rayons réfléchis; cette définition n'est point exacte : car il n'y a que les rayons réfléchis sur les points du miroir qui sont infiniment voisins de l'axe qui passent réellement par le foyer; mais, quand le miroir n'a qu'une petite étendue, relativement à la sphère à laquelle il appartient, on peut admettre, sans erreur sensible, que le foyer est le point de concentration de tous les rayons réfléchis. On peut facilement reconnaître la forme de la caustique en mettant devant un miroir concave exposé aux rayons solaires un carton blanc, dans la direction de l'axe de la caustique : on aperçoit très-nettement la section de cette surface.

1225. Les caustiques dont nous avons parlé pour les miroirs sphériques ne sont qu'un cas particulier d'une loi beaucoup plus générale, et qui peut s'énoncer ainsi : Lorqu'une surface de forme quelconque réfléchit régulièrement des rayons émanés d'un point, on peut toujours tracer sur cette surface deux systèmes de lignes courbes se coupant à angle droit, dont chacune jouit de la propriété que tous les rayons consécutifs qui se réfléchissent sur ces différents points se coupent deux à deux, et forment une surface développable. Les arêtes de rebroussement des surfaces qui s'appuient sur les courbes appartenant à un même système, étant continues, forment également une surface continue. Les points où se coupent ces deux dernières surfaces, qu'on désigne sous le nom de *caustiques*, sont les foyers. Dans le cas de la sphère, un des systèmes de courbes est formé par les méridiens, l'autre est formé de cercles dont les centres sont sur l'axe optique; les surfaces développables du premier système sont planes, et ont pour arêtes de rebroussement des courbes symétriques par rapport à l'axe; les surfaces développables du second système sont des cônes ayant leurs sommets sur l'axe : les deux surfaces caustiques sont donc une surface de révolution autour de l'axe, et l'axe lui-même; leur

Digitized by Google

intersection se réduit à un point qui est le sommet de la caustique, et le foyer se réduit aussi à un seul point. Les deux systèmes de courbes rectangulaires sur lesquelles s'appuient les surfaces développables coïncident avec les lignes de courbures dans le cas où la surface est sphérique; mais dans tous les autres cas ils en diffèrent.

Il est très-facile de construire graphiquement les courbes génératrices des caustiques formées par les rayons réfléchis sur des miroirs de révolution, puisque cette courbe doit être tangente à tous les rayons réfléchis; mais pour les miroirs sphériques on peut employer avec plus d'avantage la méthode suivante, qui est due à Petit.

Soient PA et PB (*fig.* 730) deux rayons lumineux consécutifs émanés du point P' l'intersection des rayons réfléchis correspondants; P' sera un point de la courbe génératrice de la surface de révolution; représentons par i et r les accroissements de l'angle d'incidence et de l'angle de réflexion, quand le point d'incidence passe du point O au point I. L'angle d'incidence POR a pour mesure $\frac{1}{2}AH$, et l'angle d'incidence PIS a pour mesure $\frac{1}{2}BD$: ainsi

$$i = \tfrac{1}{2}AH - \tfrac{1}{2}BD = \tfrac{1}{2}(AB + DH).$$

L'angle de réflexion FOH a pour mesure $\frac{1}{2}FH$; l'angle de réflexion GID a pour mesure $\frac{1}{2}GD$: ainsi on aura

$$r = \tfrac{1}{2}FH - \tfrac{1}{2}GD = \tfrac{1}{2}(FG - DH);$$

mais, comme $i = r$, il vient

$$AB + DH = FG - DH \text{ ou } AB - FG = -2DH \ (a).$$

Désignons par p la distance variable du point lumineux au point d'incidence, par p' la distance également variable de ce point d'incidence au point correspondant de la surface caustique, et par $4a$ la longueur IB ou IG : nous aurons sensiblement

$$AB = OI.\frac{4a+p}{p} \text{ et } FG = OI.\frac{4a-p'}{p'};$$

alors l'équation (a) devient

$$OI.\frac{4a+p}{p} - OI.\frac{4a-p'}{p'} = -2DH = -2OI$$

$$\text{ou, } \frac{4a+p}{p} - \frac{4a-p'}{p'} = -2, \text{ d'où } \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{a}$$

Si le point p était placé dans l'intérieur, il faudrait changer le signe de p, et la formule deviendrait

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}.$$

Si le point lumineux était à l'infini, on aurait $p = \infty$, et il viendrait

$$\frac{1}{p'} = \frac{1}{a}, \text{ ou } p' = a.$$

A l'aide de ces formules la courbe est très-facile à construire.

Dans le cas où le point lumineux est placé à l'infini, la caustique est une épycicloïde engendrée par un cercle dont le rayon est le quart du miroir, et qui se meut sur un cercle dont le rayon est moitié.

En effet, soit ABC (*fig.* 730 *A*) le miroir; du point O comme centre décrivons un cercle avec un rayon égal à la moitié de celui du miroir; par un point quelconque I menons le rayon

Digitized by Google

incident IK, le rayon réfléchi IL, la ligne IO, et décrivons un cercle sur Ie comme diamètre : on aura $Ia = \frac{1}{4} IK = a$, car, si du point a on abaisse une perpendiculaire ou rayon incident, cette perpendiculaire passera par le point c, et on aura $Ia = do = af = \frac{1}{4} IK$: par conséquent le point b sera un point de la caustique. Il ne reste plus alors qu'à faire voir que l'arc Fc a la même longueur que l'arc bc ou ac; or c'est ce qui est très-facile : car, l'angle bIc étant égal à l'angle cod, l'arc bc renferme deux fois plus de degrés que l'arc Fc; et, comme le dernier est décrit avec un rayon double, il s'ensuit que ces arcs sont égaux (M. Quet).

Lorsque le point lumineux est placé à une distance finie, les rayons réfléchis sont encore disposés de la même manière (*fig.* 731); mais la position du foyer F varie, soit en avant, soit en arrière du miroir : dans ce dernier cas ce sont seulement les prolongements des rayons qui se coupent, et on dit alors que le foyer est *virtuel*.

1226. Les positions relatives du point lumineux, du foyer et du miroir étant très-importantes à connaître, nous allons les décrire dans tous les cas qui peuvent se présenter; mais avant nous remarquerons qu'en vertu de la loi que suit la réflexion, si le rayon réfléchi retournait suivant la même direction, il se réfléchirait suivant la ligne d'incidence : par conséquent le point lumineux et le foyer sont réciproques, c'est-à-dire que, si le foyer devenait lumineux, le point lumineux deviendrait le foyer; c'est pour cette raison que ces deux points s'appellent *foyers conjugués*.

Supposons d'abord que le point lumineux soit situé à l'infini (*fig.* 732); soit AB un rayon incident, BF le rayon réfléchi, OD l'axe optique, c'est-à-dire le rayon de la sphère parallèle aux rayons lumineux : si l'on mène le rayon OB, il est évident que l'angle b est égal à l'angle a; et, comme ce dernier est égal à l'angle c, le triangle BFO est isocèle, et BF est égal à FO, quel que soit le point B. Or, quand B est infiniment voisin de D, F est le foyer; mais alors la ligne brisée BFO est égale à DO : par conséquent le foyer est au milieu du rayon. Dans le cas que nous considérons, le foyer porte le nom de *foyer principal* : ainsi le foyer principal est situé au milieu du rayon.

Supposons maintenant que le point lumineux s'avance de l'infini, le foyer s'avancera vers le centre et y arrivera en même temps que le point lumineux. Le point lumineux continuant son mouvement vers le miroir, le foyer s'éloignera du centre, et sera à l'infini lorsque le point lumineux sera au foyer principal. Le point lumineux dépassant le foyer principal, le foyer conjugué passera derrière le miroir, par conséquent il ne sera formé que par le prolongement des rayons et sera virtuel. Lorsque le point lumineux arrivera contre le miroir, le foyer se confondra avec lui. Si on suppose que le point lumineux continue à se mouvoir derrière le miroir, celui-ci devient convexe; le foyer repasse du côté concave, ne le quitte plus, et s'avance vers le foyer principal à mesure que le point lumineux s'éloigne. Ainsi les miroirs convexes n'ont jamais de foyers réels, et les miroirs concaves sont dans le même cas quand le point lumineux est à une distance du miroir plus petite que la moitié du rayon.

On peut obtenir d'une manière très-simple les distances relatives des foyers conjugués au miroir dans une position quelconque du point lumineux. En effet, soit MN (*fig.* 733) un miroir concave sphérique, O son centre, F le point lumineux, Fm un rayon incident, mF' le rayon réfléchi : le rayon Om divisant l'angle FmF' en deux parties égales, on aura la proportion $F'm : Fm :: F'O : FO$. Or, lorsque le point m est infiniment voisin du point D, $F'm$ et Fm se confondent avec $F'D$ et FD : par conséquent, en désignant ces dernières quantités par p' et p, et le rayon de la sphère par $2r$, la proportion précédente deviendra

$$p' : p :: 2r - p' : p - 2r; \quad \text{d'où} \quad p'(p - 2r) = p(2r - p'),$$
$$pp' - 2rp' = 2rp - pp', \; pp' - rp' = rp;$$

Digitized by Google

et, en divisant par $pp'r$, il vient

$$(a) \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{r}; \quad \text{d'où } p' = \frac{rp}{p - r}.$$

En discutant cette dernière formule, on trouverait pour p' les valeurs que nous avons indiquées précédemment.

Si dans cette formule on changeait le signe de p seulement, elle deviendrait relative au cas où les rayons qui rencontrent le miroir sont convergents au lieu d'être divergents : c'est ce qui arriverait si les rayons avaient déjà été rendus convergents par un autre miroir avant de rencontrer celui dont il s'agit. Dans ce cas la formule deviendrait

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{r}; \quad \text{d'où } p' = \frac{pr}{r + p}.$$

La formule relative aux miroirs convexes peut s'obtenir par une construction analogue à celle dont nous nous sommes servi, ou en changeant dans la formule relative aux miroirs concaves d'abord le signe de a et ensuite celui de p' pour rendre sa valeur positive; mais il faut se souvenir que le foyer est alors dans la concavité de la surface.

On peut aussi trouver les formules des foyers par une autre méthode, qu'il est bon de connaître. On a entre les angles de la *fig.* 734 les relations suivantes :

$$AF'm = r + c, \quad AFm = i - c;$$

observant que $r = i$, et retranchant la seconde équation de la première, il vient

$$AF'm - AFm = 2c.$$

Ces angles étant très-petits, on peut considérer les arcs comme se confondant avec leurs tangentes, et regarder Am comme une petite ligne droite perpendiculaire à FO : l'équation précédente donne alors

$$\frac{Am}{AF'} - \frac{Am}{AF} = \frac{2Am}{AO} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{r}.$$

Ces formules seraient applicables à des miroirs dont la surface serait engendrée par la révolution d'une courbe quelconque, pourvu que la normale de la courbe, au point où elle rencontre l'axe de révolution, fût dirigée suivant cet axe : alors r représenterait le rayon de courbure de la courbe au point de rencontre avec l'axe.

1227. La distance focale principale d'un miroir sphérique, étant égale à la moitié du rayon, peut servir à déterminer le rayon de courbure d'un miroir. L'opération est très-simple pour les miroirs concaves : il faut les exposer au soleil, chercher avec un petit écran le point où l'image est le plus vive, et mesurer la distance de ce point au miroir parallèlement à la direction des rayons solaires. Pour les miroirs convexes (*fig.* 734 *A*), il faut coller une bande de papier sur le miroir, y pratiquer deux petits trous, a et b, recevoir sur un écran les deux rayons réfléchis, et faire varier la distance de l'écran jusqu'à ce que la distance mn des deux images soit double de ab : il est évident qu'alors la distance de l'écran au miroir est sensiblement égale à la distance focale principale.

1228. Lorsque les rayons réfléchis par un miroir ont un foyer réel, il se forme dans l'espace une image du corps lumineux que l'on peut rendre visible en y plaçant un corps opaque ou en répandant de la poussière dans l'air : cette image est le lieu des foyers de tous les points de l'objet lumineux. Dans chaque cas particulier il sera

Digitized by Google

facile, d'après ce qui précède, de construire cette image : il faudra par chaque point du corps et le centre de la sphère mener une droite et déterminer le point de cette ligne où se trouve le foyer. Par exemple, soit (*fig.* 735) *AB* un objet situé en avant du centre, il est évident que son image sera renversée, et d'autant plus grande qu'il sera plus voisin du centre. Si l'objet est placé entre le centre et le miroir, l'image sera également renversée (*fig.* 736); mais, s'il était situé entre le foyer principal et le miroir, il n'y aurait pas d'image, puisque les foyers seraient virtuels. Par la même raison, les miroirs plans et convexes ne forment point d'images. Les images qui se forment dans l'espace diffèrent de celles que l'on voit dans les miroirs, mais elles en diffèrent peu. Nous reviendrons sur cet objet après avoir examiné l'organe de la vision.

Réfraction.

1229. Lorsqu'un rayon lumineux pénètre du vide dans un milieu diaphane, ou d'un milieu diaphane dans un autre plus dense, en général le rayon est dévié de sa direction et se rapproche de la normale à la surface (*fig.* 737) : c'est cette déviation que l'on désigne sous le nom de *réfraction*. On peut reconnaître cette déviation par l'observation suivante : si au fond d'un vase (*fig.* 738) on met un corps *A*, et que l'on se place en *M*, de manière à voir le corps tangent au bord du vase, en y introduisant de l'eau le corps paraît élevé, et il faut que l'œil se place en *N* pour observer le corps encore tangent au bord du vase : cet effet provient évidemment de ce que le rayon *AD* s'incline en sortant de l'eau pour entrer dans l'air. C'est par la même raison qu'un bâton plongé en partie dans l'eau paraît brisé.

On peut aussi reconnaître directement la déviation qu'éprouvent les rayons lumineux en passant d'un milieu dans un autre, en plaçant sur la route d'un rayon solaire qui pénètre dans une chambre obscure un vase formé par des plaques de verre parallèles et plein d'eau : en répandant dans ce liquide une poussière légère, on voit très-distinctement le rayon solaire dans l'air et dans l'eau, et la déviation qu'il éprouve en passant dans ce dernier milieu.

1230. *Lois de la réfraction.* On a constaté par l'expérience 1° que le rayon incident et le rayon réfracté sont dans un même plan perpendiculaire à la surface réfringente; 2° que le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant. L'angle d'incidence est l'angle formé par le rayon incident avec la normale à la surface au point d'incidence, et l'angle de réfraction celui qui est formé par le rayon réfracté avec cette même normale. Ce rapport porte le nom d'*indice de réfraction*. Dans le système de l'émission, il est égal au rapport des vitesses de la lumière dans le milieu refringent et dans le milieu environnant, et à ce rapport renversé lorsqu'on considère la lumière comme provenant des vibrations de l'éther. Cette loi, l'une des plus importantes de l'optique, a été découverte par Descartes.

Voici la méthode qu'il a employée. Un vase de verre hémisphérique, plein d'eau, recevait au centre de la surface liquide un rayon de lumière dont la direction était connue; un limbe mobile dont le centre coïncidait avec celui de la sphère pouvait se mouvoir autour de la verticale passant par ce centre : on cherchait le point d'émergence du rayon réfracté, et on mesurait directement l'angle qu'il faisait avec la verticale et la position du plan du limbe par rapport au plan vertical du rayon incident.

1231. *Angle limite.* Nous avons dit que, quand un rayon passe du vide dans un corps réfringent, l'angle d'incidence est plus grand que l'angle de réfraction, et que

Digitized by Google

la même chose a lieu quand le rayon passe d'un corps dans un autre plus réfringent. Réciproquement, quand un rayon sort d'un milieu refringent pour entrer dans le vide ou dans un milieu moins réfringent, le rayon s'écarte de la normale : ainsi il y a toujours pour chaque corps une incidence sous laquelle le rayon ne peut pas en sortir pour pénétrer dans le vide ou dans un autre corps diaphane moins réfringent, car, l'angle d'émergence (de sortie) étant toujours plus grand que l'angle d'incidence, il y a toujours une incidence plus petite que 90°, pour laquelle l'angle d'émergence est droit : cette incidence porte le nom d'*angle limite*.

Si on suppose que le rayon se présente pour sortir sous un angle plus grand que l'angle limite, la formule n'est plus applicable, car alors on aurait pour le sinus de l'angle d'émergence une valeur plus grande que l'unité, ce qui est impossible, et même la formule ne peut pas indiquer alors ce qui arrive au rayon; mais l'expérience montre qu'il se réfléchit en totalité dans l'intérieur du milieu en faisant un angle d'incidence égal à l'angle de réflexion. Ainsi, en supposant qu'un rayon *CO* (*fig.* 738 *A*) se présente sur la seconde surface d'un milieu diaphane, d'abord perpendiculairement, et qu'il s'incline toujours davantage sur la normale, le rayon réfracté, d'abord dirigé suivant le prolongement de la normale, s'incline plus que le rayon incident; il coïncide avec *OB* quand le rayon incident est dirigé suivant *OE*, faisant avec *OC* un angle égal à l'angle limite; mais, aussitôt que le rayon incident devient plus incliné, qu'il est dirigé suivant *OF*, par exemple, ce rayon est réfléchi suivant *OF'* incliné sur *OB* d'une quantité égale à l'angle *FOA*, et à mesure que le rayon s'inclinera davantage sur *AO*, le rayon réfléchi s'inclinera aussi davantage sur *OB*, et tous deux finissent par être dirigés suivant *AB*. On voit d'après cela qu'il n'y a pas continuité dans le passage de la réfraction à la réflexion intérieure.

Il résulte de là que, si un observateur était plongé dans l'eau, son œil étant en *O* (*fig.* 739), tous les rayons qui lui parviendraient seraient renfermés dans le cône droit *ABO*, dont l'angle *COB* est égal à l'angle limite; tous les points de la surface du liquide situés au delà des points *A* et *B* ne pourront transmettre à l'œil aucun rayon venu de l'extérieur; mais ces points réfléchiront comme un miroir les rayons émanés des corps situés au fond de l'eau.

Il est facile de calculer pour chaque substance le maximum de l'angle sous lequel ce phénomène doit avoir lieu, lorsqu'on connaît l'indice de réfraction d'un rayon lumineux qui passe du vide ou du milieu environnant dans ce corps. En effet, ce maximum aura évidemment lieu quand l'angle d'émergence sera droit : or, en appelant θ et θ' les angles d'incidence et de réfraction, et n l'indice de réfraction, on aura $\sin\theta = n \sin\theta'$; quand le rayon sort du corps, θ se trouve l'angle d'émergence, et à la limite d'émergence il est égal à 90°, par conséquent $\sin\theta = 1$ et $\sin\theta' = \frac{1}{n}$: ainsi l'angle limite a pour sinus l'unité divisée par l'indice de réfraction. Pour le verre et le vide, par exemple, $n = \frac{3}{2}$, et $\theta' = 41° 48' 37''$: ainsi tous les rayons qui se présenteront pour passer du verre dans le vide sous une plus grande incidence seront réfléchis dans l'intérieur du verre.

Nous venons de voir que, lorsqu'un rayon tend à sortir d'un milieu réfringent sous un angle plus grand que l'angle limite, il se réfléchit; nous ajouterons que dans ce cas la reflexion est totale, et que les images ainsi produites sont beaucoup plus brillantes que celles qu'on obtient à la surface extérieure des corps doués du plus grand pouvoir réflecteur, tels que le mercure ou les plaques métalliques dont le poli est le plus parfait. C'est ce que l'on peut facilement vérifier en mettant de l'eau dans un vase (*fig.* 740) et plaçant l'œil en *o* : la surface du liquide donne les images des

Digitized by Google

objets qui sont plongés dans l'eau comme ferait un miroir, mais leur éclat est beaucoup plus vif.

1232. On a trouvé, par expérience, que, quand on applique l'une contre l'autre deux lames parallèles ayant des pouvoirs réfringents différents, les rayons incidents et émergents sont parallèles, car les objets que l'on regarde à travers ces lames ne paraissent point déplacés de leurs positions. Ce fait nous fournit un moyen très-simple de déterminer l'indice de réfraction pour un rayon lumineux qui passe d'un milieu dans un autre, quand on connaît les indices de réfraction de ces deux corps par rapport à l'air : en effet, en désignant par m et n les indices de réfraction des deux corps, nous aurons (*fig.* 741)

$$\sin a = m \sin a' = m \sin b, \text{ et } \sin c' = \sin a = n \sin c = n \sin b',$$

d'où
$$\frac{\sin b}{\sin b'} = \frac{n}{m}.$$

Ainsi, lorsqu'un rayon lumineux passe d'un corps dans un autre, l'indice de réfraction est égal au rapport des indices de réfraction du deuxième milieu et du premier par rapport à l'air; et, comme le parallélisme des rayons incidents et émergents s'observe également quand les deux lames sont placées dans le vide ou dans un milieu quelconque, il s'ensuit que, dans le passage de la lumière d'un corps dans un autre, l'indice est égal au rapport des indices du second et du premier corps par rapport au vide ou à un milieu quelconque.

1233. Lorsqu'un rayon de lumière passe du vide dans un corps, et en général d'un corps dans un autre, indépendamment de la déviation qu'il éprouve par le fait de la réfraction, il se disperse dans une certaine étendue angulaire et se colore ; mais nous n'examinerons que plus tard ces phénomènes : dans ce qui précède, la loi doit être considérée comme étant relative au rayon qui occupe le milieu du faisceau réfracté.

1234 *Disposition des rayons réfractés dans un milieu indéfini, terminé par une surface quelconque.* Lorsque des rayons lumineux pénètrent du vide dans un milieu quelconque, ou d'un milieu dans un autre plus ou moins réfringent, les rayons réfractés, consécutifs dans de certaines directions, se coupent deux à deux, et les points d'intersection forment deux surfaces plus brillantes que les autres points de l'espace traversé par les rayons : ces surfaces, analogues à celles que forment les rayons réfléchis, portent aussi le nom de *caustiques,* et les points d'intersection de ces surfaces portent également le nom de *foyers.* Quelquefois ce sont seulement les prolongements des rayons réfractés qui se rencontrent : alors les foyers sont *virtuels.*

Quand la surface est de révolution autour d'un axe passant par le point lumineux, les deux surfaces caustiques sont l'axe de révolution lui-même et une surface de révolution autour de cet axe. Ces caustiques pourraient se construire en traçant dans un même méridien un grand nombre de rayons réfractés et une courbe tangente à tous ces rayons; on pourrait même, dans le cas où la surface est sphérique, obtenir une équation analogue à celle du n° 1225 qui servirait à la tracer par points; mais nous nous bornerons à donner la détermination du foyer pour le cas des surfaces sphériques.

1235. Soit n l'indice de réfraction, P (*fig.* 742) le point lumineux, C le centre de la surface réfringente, PM un rayon incident s'écartant très-peu de l'axe AC, $P'M$ le rayon réfracté : posons $AC = r$, $AP = p$, $AP' = p'$, nous aurons entre les angles des triangles PMC et CMP' les relations suivantes :

$$CPM = CMN - MCA,\ CP'M = MCA - CMP' \text{ et } CMN = n.\ CMP';$$

Digitized by Google

d'où l'on tire $$CPM + nCP'M = (n-1)\,MCA.$$

Ces angles étant très-petits peuvent être considérés comme ayant pour tangentes AM, sous les rayons PA, $P'A$ et AC, et être remplacés par leurs tangentes : remplaçant donc ces angles par leurs tangentes, et divisant par AM, il vient

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n-1}{r};$$

en faisant p infini, on aura $$\frac{n}{p'} = \frac{n-1}{r}:$$

p' est ici la distance focale principale; en la désignant par a, l'équation primitive devient

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p'} = \frac{n}{a}. \qquad (a)$$

La formule relative à une surface concave s'obtient en changeant dans cette équation les signes de a et de p'; elle devient alors

$$\frac{n}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{n}{a}. \qquad (b)$$

En faisant $r = \infty$, il vient

$$\frac{n}{p'} + \frac{1}{p} = 0, \qquad (c)$$

équation des foyers conjugués relatifs à une surface plane.

Si le point lumineux était dans le milieu le plus réfringent, il faudrait dans toutes ces formules changer p en p', et réciproquement, ou considérer n comme étant l'indice du milieu le plus réfringent par rapport à l'autre.

1236. *Disposition des rayons lumineux à leur sortie d'un milieu réfringent, terminé par des surfaces planes.* Supposons d'abord que le milieu soit terminé par deux faces parallèles AB et CD (*fig.* 743), chaque rayon en pénétrant par la surface AB éprouvera une déviation; mais comme il se présentera pour sortir sur la surface CD sous un angle parfaitement égal à l'angle de réfraction sur AB, puisque AB est parallèle à CD, il sortira nécessairement sous un angle égal à l'angle d'incidence sur AB : ainsi les rayons incidents et les rayons émergents seront parallèles.

1237. Supposons maintenant que les deux surfaces qui terminent le corps réfringent soient deux surfaces planes inclinées AB et AC (*fig.* 744), et considérons d'abord les rayons incidents situés dans un plan perpendiculaire aux deux faces, c'est-à-dire dans la section principale du prisme. Le rayon incident ab, en se réfractant suivant bc, se rapproche de la perpendiculaire bm, et par conséquent s'éloigne du sommet A du prisme; et le rayon émergent cd, en s'éloignant de la normale cm', s'éloigne encore du sommet A : ainsi l'effet d'un milieu réfringent angulaire est d'éloigner le rayon émergent du sommet de l'angle. Il est facile de voir qu'il en serait de même si le rayon incident ab se trouvait au-dessus de la normale au point b (*fig.* 745).

Si on suppose (*fig.* 746) que la face AC du prisme tourne autour de l'arête qui passe par le point A, de manière à augmenter l'angle réfringent du prisme, l'incidence du rayon réfracté bc sur la face AC augmentera continuellement à mesure que l'angle A deviendra plus grand : il existera donc nécessairement une grandeur de cet

Digitized by Google

angle, pour laquelle tous les rayons arrivés par AB, quelle que soit d'ailleurs leur incidence sur BA, se réfléchiront sur AC. L'angle du prisme cherché sera évidemment celui pour lequel un rayon incident Ba (*fig.* 747) émergerait suivant bC : car tout autre rayon incident donnerait un rayon réfracté qui rencontrerait AC sous un angle plus grand, et qui serait réfléchi intérieurement; et les rayons ne pourraient pas non plus émerger après avoir subi plusieurs réflexions, parce que les rayons réfléchis s'inclinent toujours davantage sur les surfaces du prisme, et par conséquent ne peuvent pas sortir. Or, dans ce cas, $\theta = \theta'$, égale l'angle limite, puisque ces deux angles correspondent à des angles d'incidence et d'émergence droits; mais 2θ est le supplément de l'angle D, et A est également le supplément de l'angle D : donc $A = 2\theta$. Pour le verre ordinaire, $n = 31 : 20$, et $2\theta = 83° 37' 14''$.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que le rayon réfracté était dirigé vers l'ouverture du prisme; mais s'il était dirigé vers le sommet, il se redresserait à chaque réflexion et finirait par émerger. Pour savoir quand cette circonstance aura lieu, considérons le prisme ABC (*fig.* 748); au point a menons la normale DaE et la perpendiculaire ab sur AC; il est évident que, pour qu'un rayon entré par a se réfléchisse sur AC du côté du point A, il faut que le rayon refracté soit dirigé au-dessus de ab, et par conséquent qu'il fasse avec aE un angle plus grand que l'angle du prisme : ce qui n'est pas possible quand l'angle A est égal à l'angle limite, et à plus forte raison quand il est égal au double de cet angle.

Si l'angle A (*fig.* 749) était seulement égal à θ, tous les rayons incidents compris dans l'angle SaA seraient réfléchis sur la face AC; mais tous ceux qui seraient renfermés dans l'angle SaB émergeraient par AC. En effet, le rayon incident Sa perpendiculaire à AB donnera un rayon réfracté ab, qui fera avec la normale à la face AC un angle égal à l'angle A, c'est-à-dire égal à l'angle limite : alors le rayon émergent correspondant sera dirigé suivant bC. Si maintenant on suppose que le rayon s'incline vers le point A, les rayons réfractés correspondants feront avec la normale à AC des angles plus grands que θ et seront réfléchis, tandis que, si on suppose que le rayon s'incline vers le point B, les rayons réfractés correspondants feront avec la normale à AC des angles plus petits que θ, et sortiront du prisme.

Il est facile de voir que, si l'angle A était compris entre θ et 2θ, la réflexion sur AC commencerait à partir d'un rayon incident aS', d'autant plus rapproché de aB que l'angle A s'approcherait davantage de 2θ.

Si l'angle A était plus petit que θ, la réflexion sur AC s'arrêterait au rayon incident aS'', qui sera d'autant plus rapproché de aA que l'angle A sera plus petit, et ce rayon ne coïncidera avec aA que quand l'angle A sera nul. En effet, le rayon Aa se réfracte au point a, suivant une droite ac faisant avec ab un angle égal à l'angle limite θ, et il se présente pour sortir en faisant avec la normale un angle $m = \theta + A$: car, l'angle acC extérieur au triangle cab étant égal à la somme des deux angles intérieurs opposés, on a $90° + m = 90° + A + \theta$: le rayon Aa ne pourra donc sortir que quand on aura $A = 0$.

1238. Jusqu'ici nous avons supposé que le plan d'incidence était perpendiculaire aux deux faces du prisme; il nous reste à examiner quelles seraient les conditions d'émergence si ce plan avait une direction quelconque.

Soit ABC (*fig.* 750) la section principale du prisme qui passe par un point a quelconque de la surface d'incidence. Élevons la normale ab à cette surface, et décrivons autour de cette ligne comme axe un cône droit man, ayant pour angle au sommet le double de l'angle limite; ce cône renfermera tous les rayons réfractés qui pénètrent dans le prisme par le point a; de ce même point abaissons une perpendiculaire ac sur la face d'émergence AC, et décrivons de même autour de cette ligne un

Digitized by Google

un cône droit ayant un angle au sommet double de l'angle limite, ce cône renfermera évidemment tous les rayons réfractés correspondants au point d'incidence a qui pourront émerger : par conséquent, la partie commune des deux cônes renfermera tous les rayons qui pourront traverser le prisme. Mais l'angle formé par les axes des deux cônes est égal à l'angle du prisme : par conséquent, quand l'angle du prisme sera égal à 2θ, les cônes seront tangents; un seul rayon pourra traverser le prisme, et ce rayon sera évidemment celui qui est dirigé dans la section principale du prisme suivant Ba. Pour un angle plus grand du prisme, les deux cônes ne se pénétreront pas, et aucun rayon ne pourra traverser le prisme, quelle que soit d'ailleurs la direction du plan d'incidence. Si les cônes se pénètrent, il est facile de voir que les rayons incidents qui pourront traverser le prisme sont compris dans un cône qui coupe le plan AB, suivant deux arêtes situées dans les plans abr et abs du côté de aB, et dont l'arête la plus élevée correspond au rayon réfracté aq, lequel coïncide avec la normale quand l'angle du prisme est égal à θ, se rapproche de aA quand l'angle du prisme est plus petit que θ, de aB quand il est plus grand, et finit par coïncider avec aB quand cet angle est égal à 2θ.

1239. *Déviation que les prismes font éprouver aux rayons qui les traversent.* Soit ABC (*fig.* 751) la section principale d'un prisme, les rayons qui peuvent émerger et qui passent par le point m sont compris dans l'angle BmI, Im étant le rayon incident qui, prolongé par réfraction, rencontre la normale à la face AC sous un angle égal à l'angle limite.

La valeur de l'angle x peut s'obtenir de la manière suivante :
Dans le triangle mdk on a $r = \theta - a$; et, comme $\sin x = n \sin r$, il vient

$$\sin x = n \sin(\theta - a) = n(\sin\theta \cos a - \sin a \cos\theta); \qquad (1)$$

mais $$\sin\theta = \frac{1}{n} \quad \text{et} \quad \cos\theta = \frac{1}{n}\sqrt{n^2 - 1}:$$

ainsi, $$\sin x = \cos a - \sin a \sqrt{n^2 - 1}.$$

En faisant dans l'équation (1) $a = \theta$, $a = 2\theta$, on trouve $x = 0$ et $x = -1$, ce que nous savions déjà.

Supposons maintenant que le rayon incident Im tourne autour du point m en se rapprochant de mB, le rayon émergent, d'abord dirigé suivant dC, se relèvera constamment; et si par le point quelconque n on mène une ligne nE, formant avec la normale en ce point un angle égal à x, il est évident que toutes les lignes menées par le point n parallèles aux rayons émergents seront comprises dans l'angle CnE. Il suit de là qu'à mesure que le rayon incident se rapproche de mB, le rayon émergent s'éloigne de nC: il y aura donc un rayon incident Lm dont le rayon émergent nP formera avec nC un angle PnC égal à LmB. On désigne sous le nom de *déviation* le plus petit des angles formés par les prolongements des rayons incidents et émergents. On voit d'après cela que les déviations des rayons incidents Im et Bm sont égales, car les rayons émergents correspondants sont nC et nE, et que de part et d'autre du rayon Lm, dont le rayon émergent sort sous un angle égal à l'angle d'incidence, il existe toujours des rayons incidents ayant même déviation. En effet, considérons un rayon incident $L'm$ situé au-dessus de Lm, le rayon émergent correspondant nP' sera placé au-dessous de nP; menons un autre rayon incident $L''m$ dont l'angle d'incidence soit égal à l'angle d'émergence du premier, il sera placé en dessous de Lm, le rayon émergent sera nP'', et la déviation des deux rayons sera la même. Ainsi, de

Digitized by Google

part et d'autre de Lm, les rayons ont deux à deux la même déviation ; la déviation de part et d'autre de Lm varie donc dans le même sens ; donc la déviation correspondante à Lm est un maximum ou un minimum. Pour reconnaître lequel des deux, il suffit de voir si la déviation du rayon $L'm$ très-voisin de Lm (*fig.* 732) est plus grande ou plus petite que celle de Lm. Pour cela, prolongeons les rayons Lm et Pn jusqu'à leur rencontre en k ; D sera la déviation du rayon Lm ; et si par le point k on mène les droites kl' et kp' parallèles aux rayons $L'm$ et $P'n$, en désignant par D' la déviation du rayon $L'm$, on aura $D' = D + b - a$; et suivant que a sera $>$ ou $<$ que b, D' sera $<$ ou $>$ que D. Or a est le décroissement de l'angle d'incidence correspondant au décroissement de l'angle de réfraction pmn', et b est l'accroissement de l'angle d'émergence correspondant à l'accroissement de l'angle de réfraction de $n' \rightarrow n$; mais cet angle est évidemment égal à l'angle nmn'. Ainsi les angles a et b sont les variations des angles d'incidence correspondants à des variations égales, et en sens contraire de l'angle de réfraction ; mais on sait que les angles varient plus rapidement que les sinus, et d'autant plus que les arcs sont plus grands. Par conséquent, si deux angles sont assujettis à avoir leurs sinus dans un rapport constant, le rapport du plus grand angle au plus petit croîtra à mesure qu'un des arcs deviendra plus grand : donc l'accroissement de l'angle d'incidence est plus grand que le décroissement pour la même variation de l'angle de réfraction ; donc b est plus grand que a ; par suite, D est plus grand que D', et la déviation correspondante à un angle d'émergence égale à l'angle d'incidence est un minimum.

On peut facilement vérifier par l'expérience les résultats précédents. Si on dirige un rayon de lumière sur un prisme dont les arêtes sont horizontales, et qu'on le fasse tourner autour d'un axe horizontal de manière à faire varier les angles d'incidence, on voit, quand on tourne le prisme dans un sens quelconque, mais toujours le même, l'image changer de place, rester stationnaire et marcher ensuite en sens contraire ; quand le sommet du prisme est en haut, l'image est stationnaire quand elle est au point le plus haut de sa course, et c'est le contraire quand le sommet est en bas. Lorsqu'on regarde un objet à travers un prisme, les mêmes effets ont lieu ; mais l'image stationnaire est au point le plus bas quand le sommet du prisme est en haut, et au point le plus haut quand le sommet du prisme est en bas, parce que, dans ce cas, les rayons émergents qui sont les plus abaissés produisent l'image la plus élevée.

1240. *Lentilles.* On désigne sous le nom de lentilles des masses d'un corps diaphane terminées par des portions de sphères. On en connaît de deux espèces, les lentilles convergentes et les lentilles divergentes, ainsi désignées parce que les premières rapprochent les rayons qui les ont traversées, et que les dernières les éloignent. Les premières sont toujours plus épaisses au centre que vers les bords, les lentilles divergentes sont toujours au contraire plus minces au centre que vers les bords ; la *fig.* 735 présente toutes les formes de lentilles convergentes ; et la *fig.* 734 toutes celles des lentilles divergentes. Il est facile de reconnaître qu'elles jouissent de la propriété que nous avons énoncée. En effet, les surfaces courbes qui terminent les lentilles peuvent être considérées comme formées d'une infinité de petites surfaces planes, et les petites surfaces planes opposées comme appartenant à des prismes tronqués (*fig.* 735, 736) : or ces prismes ont leurs bases tournées vers l'axe de la lentille lorsqu'elle est plus épaisse au centre que vers les bords, et vers les bords dans le cas contraire ; mais nous avons vu que, quand un rayon lumineux traversait un prisme, le rayon émergent se rapprochait de la base : donc les lentilles *fig.* 735 font converger les rayons, et les lentilles *fig.* 734 les rendent divergents.

1241. Lorsqu'un système quelconque de rayons traverse une lentille, les rayons

Digitized by Google

émergents consécutifs dans certaines directions se coupent deux à deux, et forment des surfaces caustiques comme les rayons réfléchis sur les miroirs sphériques, et les sommets de ces caustiques sont encore désignés sous le nom de foyers; mais, comme en général on n'emploie jamais que des lentilles dont les faces ne sont qu'une très-petite fraction des surfaces sphériques auxquelles elles appartiennent, on peut considérer tous les rayons qui les traversent comme se réunissant sensiblement au foyer.

1242. *Détermination des foyers des lentilles.* Supposons d'abord les rayons incidents parallèles entre eux et à l'axe de figure de la lentille; soit XY (*fig.* 757) cet axe de figure, c'est-à-dire la ligne qui passe par les centres C et C' des deux sphères qui la terminent; et LM un rayon incident infiniment voisin de l'axe : le rayon réfracté MN étant prolongé rencontrera l'axe en un point G, qui serait le foyer principal dans le cas où la substance de la lentille serait prolongée indéfiniment au delà de la surface d'incidence; mais le rayon réfracté MN éprouve une nouvelle déviation, et le point P', où le rayon émergent vient rencontrer l'axe, est le foyer principal de la lentille.

En désignant par r et r' les rayons des deux sphères, on aura d'abord (1235)

$$AG = \frac{rn}{n-1}.$$

Mais on peut considérer les points P' et G comme foyers conjugués par rapport à la surface sphérique A', car, si le point P' était lumineux, le rayon incident $P'N$ se réfracterait suivant MN : on aura donc la relation

$$\frac{1}{P'A'} - \frac{n}{A'G} = \frac{n-1}{r'}.$$

En négligeant l'épaisseur de la lentille on aura

$$AG = A'G, \quad A'P' = AP' = a,$$

et les deux équations précédentes donneront

$$\frac{1}{a} = \frac{n-1}{r'} + \frac{n-1}{r}, \quad \text{d'où } a = \frac{rr'}{(n-1)(r+r')};$$

et, si $r = r'$,

$$a = \frac{r}{2(n-1)}.$$

Dans le cas que nous venons d'examiner, les deux sphères tournaient leur convexité en dehors; mais la formule conviendra à tous les cas en changeant le signe des rayons des sphères dont la concavité est dirigée vers le milieu environnant; ainsi, pour les lentilles biconcaves on aura

$$a = -\frac{rr'}{(r+r')(n-1)};$$

et, pour les lentilles concaves-convexes,

$$a = -\frac{rr'}{(r-r')(n-1)}.$$

Quand a est positif, le foyer est réel; il est virtuel dans le cas contraire : il est facile de voir, d'après cela, que les lentilles dont l'épaisseur est plus grande au centre que vers les bords sont les seules qui aient un foyer réel.

Digitized by Google

Enfin il résulte de la forme même de la valeur de a que la distance focale est la même, quelle que soit la face par laquelle entrent les rayons.

Supposons maintenant que le point lumineux soit à une distance finie de la lentille, mais situé sur l'axe de figure; soit PM (*fig.* 758) un rayon incident très-voisin de l'axe, MN le rayon réfracté, NG le prolongement de ce rayon, et NP' le rayon émergent: P et G pouvant être considérés comme foyers conjugués par rapport à la surface sphérique A, on aura, en désignant AP par p,

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{AG} = \frac{n-1}{r};$$

et, comme P' et G sont aussi des foyers conjugués, on a, en désignant $A'P'$ par p',

$$\frac{1}{p'} - \frac{n}{A'G} = \frac{n-1}{r'}.$$

En posant $AG = A'G$, ce qui revient à négliger l'épaisseur de la lentille, et ajoutant ces deux équations, il vient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{n-1}{r} + \frac{n-1}{r'} = \frac{1}{a'}. \qquad (1)$$

a désignant la distance focale principale. Si la lentille était divergente, il faudrait changer le signe de p' et celui de a, et la formule deviendrait

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{p'}. \qquad (2)$$

Nous avons supposé dans ce qui précède que le point lumineux était placé sur l'axe de figure de la lentille; il reste à examiner le cas où cette circonstance n'aurait pas lieu. Mais avant nous devons parler du centre optique.

On désigne sous ce nom un point de l'axe de figure d'une lentille qui jouit de cette propriété que tout rayon qui passe par ce point émerge suivant une droite parallèle au rayon incident. La position de ce point est facile à déterminer.

Soit AB (*fig.* 759) une lentille bi-convexe dont les deux faces ont leur centre en C et C', et soit O le centre optique cherché; une ligne quelconque MN passant par le point O sera également inclinée sur les normales CM et CN, car, si par les points M et N on menait deux plans tangents à la lentille, les rayons incidents et émergents auraient la même direction que s'ils avaient traversé un prisme terminé par ces deux plans; mais, les rayons incidents et émergents étant parallèles, il en résulte nécessairement que les deux plans sont parallèles, et par conséquent que les angles CMO et $C'NO$ sont égaux; alors les triangles COM et $C'ON$ sont aussi égaux, et on a

$$CO : C'O :: CM : C'N, \quad \text{ou} \quad CM - CO : C'N - C'O :: CM : C'N,$$

$$\text{ou} \quad OH : IO :: CH : C'I.$$

Ainsi le centre optique partage l'épaisseur de la lentille en deux parties proportionnelles aux rayons des faces auxquelles elles aboutissent: il résulte de là que, si les faces ont même courbure, le centre optique de la lentille est au milieu de son épaisseur, et que, si une des surfaces est plane, le centre optique coïncide avec le point où l'axe de figure rencontre la face courbe.

Il résulte de ce qui précède qu'un rayon incident dont le rayon réfracté passe par le centre optique n'éprouve point de déviation en sortant de la lentille; mais, si nous considérons d'autres rayons incidents voisins du premier, les rayons émergents correspondants seront déviés (*fig.* 760), et rencontreront le premier en un point qui sera le foyer. Pour en déterminer la position, soit P le point lumineux, et o le centre optique, xy l'axe optique, le rayon PO sortira sans déviation; soit PD un autre rayon parallèle à l'axe optique de la lentille, le rayon

Digitized by Google

émergent correspondant coupera l'axe xy au point F, foyer principal de la lentille, et PO en un point P', qui sera le foyer conjugué de P : or, en conservant les notations précédentes, et en considérant la figure $PDFP'$ comme un triangle, ce qui revient à négliger l'épaisseur de la lentille, on a

$$PP' : OP' :: PD : OF \quad \text{ou} \quad p + p' : p' :: p : a,$$

attendu que PD et PO ne diffèrent que d'une quantité de l'ordre de l'épaisseur de la lentille, que nous regardons comme assez petite pour être négligée. Cette dernière formule donne

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}.$$

Ainsi dans tous les cas la formule est la même ; seulement, quand le point lumineux n'est pas sur l'axe de figure, l'axe optique est une ligne brisée qui passe par le centre optique.

Ce résultat n'est cependant qu'une approximation bien grossière : aussi les conséquences qu'on en déduit ne sont pas confirmées par l'expérience. Il résulte du calcul que nous venons de faire que le foyer principal est toujours à la même distance de la lentille, quelle que soit la direction des rayons incidents par rapport à l'axe de la lentille ; et il n'en est point ainsi : on trouve par expérience que le foyer se rapproche de la lentille à mesure que les rayons incidents sont plus écartés de l'axe quand la lentille est bi-convexe ; et que le contraire a lieu quand la lentille est concave-convexe, convergente, et que les rayons incidents entrent par la surface concave.

Si le faisceau de lumière qui vient rencontrer la lentille était convergent au lieu d'être divergent, comme nous l'avons toujours supposé, il faudrait changer le signe de p dans la formule : dans ce cas le foyer devient virtuel quand il se trouve du côté de la lentille opposé à celui où se trouve le point de concours des rayons incidents. Il serait facile, d'après cela, de trouver le foyer relatif à un nombre quelconque de lentilles dont on connaîtrait les courbures et les positions. Dans tous les cas, les formules précédentes ne sont qu'approximatives, car dans toutes nous avons négligé l'épaisseur de la lentille. Les formules exactes s'obtiendraient facilement en faisant $A'G = AG + c$: on obtiendrait alors des formules assez compliquées, qui ne sont d'aucun usage. Lorsqu'on suppose la lentille terminée par une seule enveloppe sphérique pleine d'eau, pour laquelle $n = \frac{4}{3}$, on trouve en ayant égard à l'épaisseur de la lentille que la distance focale principale est égale au rayon de la sphère, résultat fort remarquable.

En discutant la formule générale qui lie les distances du point lumineux et du foyer à la lentille, on trouvera facilement pour ces deux points les positions relatives que nous allons décrire. Supposons d'abord que la lentille soit convergente : si le point lumineux est à l'infini, le foyer conjugué se trouve derrière la lentille et au foyer principal ; à mesure que le point lumineux s'approche, le foyer conjugué s'éloigne de la lentille, et se trouve à l'infini lorsque le point lumineux est arrivé à la distance du foyer principal ; si le point lumineux continue à s'approcher, le foyer passe du même côté que le point lumineux : il est alors virtuel ; à mesure que le point lumineux continue à s'approcher de la lentille, le foyer s'en approche aussi davantage, et, quand le premier a atteint la lentille, le second y est arrivé. Pour une lentille divergente, lorsque le point lumineux est situé à l'infini, le foyer principal est du même côté et par conséquent virtuel ; à mesure que le point lumineux s'approche, le foyer se rapproche aussi de la lentille ; lorsque le point lumineux est arrivé à la distance focale principale, le foyer, toujours virtuel, est à la moitié de cette distance ; si le point lumineux continue à s'approcher, le foyer conjugué arrive sur la lentille en même temps que le point lumineux.

1243. Lorsqu'un corps lumineux est placé devant une lentille convergente, à une distance plus grande que la distance focale principale, chacun de ses points a un foyer particulier, et l'ensemble de tous ces foyers forme dans l'espace une image du corps

Digitized by Google

lumineux : cette image est toujours renversée, parce que l'axe optique de chaque point sur lequel se trouve le foyer de ce point passe par le centre de la lentille. Ces images peuvent être rendues visibles en plaçant dans leur lieu un carton ou un verre dépoli.

1244. *Détermination des indices de réfraction.* La connaissance des indices de réfraction des corps diaphanes étant d'une très-haute importance, nous allons décrire les méthodes qui ont été employées pour les déterminer, et nous donnerons le tableau des résultats obtenus. Mais auparavant nous ferons remarquer que, les pouvoirs réfringents de l'air et des gaz étant très-petits par rapport à ceux des corps solides et liquides, on peut sans erreur sensible prendre pour indice d'un de ces corps celui que l'on observe quand la lumière passe de l'air dans ce corps ; et nous donnerons la définition de deux expressions qui se reproduiront souvent par la suite : on désigne sous le nom de *puissance réfractive* d'un corps le carré de l'indice de réfraction diminué de l'unité, et sous le nom de *pouvoir réfringent* la puissance réfractive divisée par la densité, ou la puissance réfractive sous l'unité de densité. Ces dénominations proviennent de ce que dans le système de l'émission la quantité $n^2 - 1$ représente l'action du corps sur la lumière.

La détermination des indices de réfraction peut se faire d'un grand nombre de manières différentes : la suivante, qui est due à Newton, est la plus simple et la plus précise. Supposons d'abord qu'il s'agisse d'une matière solide. On commence par former un prisme ABC (*fig.* 761) avec cette substance, et on le met dans une position fixe de manière que ses arêtes soient verticales ; on place au point M un cercle horizontal divisé dont l'alidade est garnie d'une lunette renfermant un fil vertical ; on dirige la lunette sur une mire N, située à une grande distance ; on observe ensuite cette même mire vue par réfraction à travers le prisme, et on fait tourner ce dernier jusqu'à ce que la déviation du rayon réfracté sur le rayon direct ou l'angle b soit le plus petit possible ; les angles d'incidence et d'émergence u et u' seront alors égaux, ainsi que les angles de réfraction x et x' ; et il est facile de reconnaître à l'inspection de la figure que, l'angle G étant à la fois le supplément des angles a et $2x$, on a $x = \frac{a}{2}$, et que, l'angle b, qui représente la déviation parce que la mire est très-éloignée, étant un des angles extérieurs du triangle EKF, on a $b = 2(u - x) = 2\left(u - \frac{a}{2}\right)$, d'où $u = \frac{a+b}{2}$. Ainsi, en désignant par n l'indice cherché, on aura $n = \sin\frac{a+b}{2} : \sin\frac{a}{2}$.

Par cette méthode on évite la mesure des angles d'incidence et d'émergence, qu'il serait indispensable de connaître dans toute autre position du prisme.

1245. Quant à la mesure de l'angle réfringent du prisme, on peut y parvenir de bien des manières différentes. Nous nous contenterons d'exposer ici celles qui sont susceptibles de la plus grande exactitude. Soient BA et AC (*fig.* 762) les deux faces d'un prisme ; en un point quelconque M on placera un cercle répétiteur, dont le plan soit perpendiculaire aux arêtes du prisme ; on dirigera une des lunettes sur une mire o très-éloignée, et l'autre sur l'image de cette mire, vue par réflexion sur la face AB, suivant la direction MH ; les rayons Mo et Ho pouvant être regardés comme parallèles, l'angle a mesuré par l'écartement des lunettes sera double de l'angle c : car a est le supplément de l'angle oHM, et ce dernier a aussi pour supplément les angles oHB et MHA, égaux entre eux. On transportera ensuite le cercle répétiteur en un point N, situé de l'autre côté, où l'on opérera de la même manière, c'est-à-dire que l'on me

Digitized by Google

surera l'angle b que forment les lunettes du cercle, dirigées l'une sur un signal o' très-éloigné, l'autre sur l'image du signal vue par réflexion sur la face AC; l'angle b sera évidemment le double de l'angle c'. Enfin, d'un troisième point P, où l'on transportera le cercle, on dirigera les lunettes sur les deux mires o et o', et on obtiendra l'angle d formé par les lignes Po et Po'. Or, si par le point P on mène deux droites parallèles aux faces du prisme, il est facile de voir qu'on aura $d = A + \frac{1}{2}a + \frac{1}{2}b$,

d'où $$A = d - \frac{1}{2}(a + b).$$

Il serait beaucoup plus simple de se servir d'une seule mire très-éloignée, qu'on observerait directement, et par reflexion, sur les deux faces du prisme (*fig.* 763); il est facile de voir, à la seule inspection de la figure, qu'on aurait alors

$$A = \frac{a + b}{2}.$$

1246. Pour obtenir l'indice de réfraction des substances liquides, on emploie un procédé analogue. On les introduit dans des prismes formés d'une masse de verre (*fig.* 764) percée horizontalement d'un canal circulaire, et taillée en prisme sur les deux faces auxquelles il aboutit; on ferme ce canal par deux plaques de glace, à faces bien parallèles, qui sont pressées par des vis; la masse de verre est percée d'un autre petit canal ab, afin de pouvoir mettre et enlever les liquides sans déplacer les glaces.

De semblables prismes vides ne font évidemment éprouver aucune déviation au rayon lumineux : par conséquent, l'effet produit dans le cas où les lames sont partout d'égale épaisseur est entièrement dû au prisme liquide qui remplit le prisme creux; mais, comme il est extrêmement difficile de se procurer des glaces dont les faces soient exactement parallèles, on commence par observer la déviation produite par le défaut de parallélisme, et on en corrige l'effet total.

Il existe plusieurs autres procédés pour déterminer les indices de réfraction des corps solides et liquides; nous en parlerons plus tard, lorsqu'il sera question du microscope et de la diffraction. Mais il en est un facilement applicable aux corps solides et aux liquides que nous devons décrire ici.

1247. Soit ABC (*fig.* 765) un prisme rectangulaire en C, formé de la substance diaphane dont on veut déterminer l'indice, et placé sur un support horizontal RS, sur lequel repose une tige TU, garnie d'une coulisse portant un cercle divisé et une lunette. La lunette étant d'abord placée en un point élevé du support, on verra les rayons lumineux entrés par AC; mais à mesure qu'on l'abaissera, les rayons réfractés sur AC devenant plus obliques, il existera nécessairement une position où le point P cessera de laisser passer les rayons incidents entrés par AC, et où il réfléchira les rayons venus par AB. A cet instant, l'angle ϕ sera égal à l'angle limite : or, on peut facilement déduire ϕ de l'angle a, et du premier l'indice de réfraction, puisque son sinus est égal à $\frac{1}{n}$.

On a $\sin\phi = \cos c$, $\sin c = \frac{1}{n}\sin b$, $\sin b = \cos a$, et $\sin\phi = \frac{1}{n}$, d'où l'on déduit $n^2 = 1 + \cos^2 a$

1248. Si au-dessous de la surface AC on place une goutte M d'un liquide ayant

Digitized by Google

un pouvoir réfringent plus petit que la substance du prisme, on parviendra de la même manière à trouver la valeur de l'angle limite au moyen de l'angle a; et comme le sinus de cet angle limite est égal au rapport de l'indice de réfraction du liquide à celui de la substance du prisme, on en déduira facilement ce premier indice quand le second sera connu.

Dans ce cas, les relations précédentes subsistent, excepté la dernière, qui devient $\sin b = \frac{n'}{n}$: alors on trouve $n'^2 = n^2 - \cos^2 a$.

1249. Si, au lieu de placer en M un corps transparent, on y mettait un corps opaque, il existerait aussi un angle b sous lequel les rayons émanés de ce corps cesseraient de pénétrer dans le prisme, et où le point P réfléchirait tous les rayons arrivés par AB. On peut alors, à l'aide de cet angle limite, déterminer l'indice de réfraction du corps solide; mais pour ces corps, lorsqu'on admet le système de l'émission, la formule n'est pas la même que pour les corps diaphanes. Nous reviendrons sur cette question quand nous parlerons du système de l'émission.

Il est important de remarquer que la méthode que nous venons d'indiquer suppose nécessairement que l'angle c est plus petit que l'angle limite b : car, s'il n'en était pas ainsi, le rayon n'émergerait pas; et comme l'angle c est complément de l'angle b, la méthode n'est applicable qu'autant que b est plus grand que 45°. Elle n'est par conséquent pas applicable au verre ordinaire, pour lequel b excède peu 42°; mais on peut, dans tous les cas, employer un prisme dont l'angle c soit aigu; la formule qui donne la valeur de l'indice est seulement un peu plus compliquée que quand l'angle est droit.

Soit ABC (*fig.* 766) un prisme de la substance dont on veut déterminer l'indice de réfraction, fixé sur l'alidade d'un cercle horizontal, de manière que le côté AB soit parallèle à l'axe de l'alidade, et que les arêtes soient verticales; et MN une lunette horizontale fixe, renfermant deux fils croisés dans l'axe, et dont l'axe correspond au diamètre du cercle qui passe par le zéro de la division. Tournons l'alidade jusqu'à ce que la réflexion devienne totale au point de croisement des fils : alors, en désignant cet angle par d, nous aurons

$$\sin b = \frac{1}{n}, \quad \sin b = n \sin a, \quad b = A + a \quad \text{et} \quad b = 90 - A - d,$$

relation d'où l'on déduit facilement

$$n^2 = \frac{\cos^2(A+d) + 1 - 2\cos A \cos(A+d)}{\sin^2 A}$$

1250. La détermination de l'indice de réfraction des gaz peut se faire par la première méthode que nous avons d'abord indiquée pour les liquides; mais l'appareil est beaucoup plus compliqué, attendu qu'il faut pouvoir faire le vide dans le prisme creux, y introduire le gaz sans que l'air puisse s'y mêler, et mesurer facilement la température et la pression. La figure 767 représente l'appareil qui a été employé par MM. Biot et Arago dans un grand nombre d'expériences sur la réfraction des gaz. Il est composé d'un gros tube de verre terminé obliquement, et fermé par deux glaces faisant entre elles un angle très-grand; ce tube est percé supérieurement et inférieurement de deux ouvertures : la première communique avec un tube fermé très-long, renfermant un baromètre à siphon, destiné à mesurer la force élastique du gaz; la seconde avec un tuyau garni d'un robinet que l'on peut mettre en communication,

Digitized by Google

d'abord avec une machine pneumatique pour faire le vide dans le prisme creux, et ensuite avec des cloches pleines de gaz afin de les introduire dans le prisme. En observant la déviation à travers le prisme vide, on obtiendra le rapport de réfraction pour un rayon qui passe du vide dans l'air ; et comme toutes les observations faites en introduisant différents gaz dans le prisme donnent seulement ce rapport pour le passage de l'air dans les gaz, le premier rapport fournira le moyen d'avoir celui du vide et de ces gaz.

Ces expériences exigent une grande précision dans la mesure de la déviation, attendu que, malgré le grand angle du prisme, elle est toujours très-petite, en général d'un petit nombre de minutes, et qu'une petite erreur sur la déviation en produirait une très-grande sur la valeur de l'indice. Nous ne pouvons pas entrer dans tous les détails qui seraient nécessaires ; nous chercherons seulement à faire comprendre les principes sur lesquels repose la marche des opérations.

D'abord, malgré le grand angle du prisme, la déviation est trop petite pour que la lunette du cercle divisé puisse être amenée successivement sur l'image directe et sur l'image réfractée, à cause de l'épaisseur de prisme. On pourrait à la vérité l'amener d'abord sur cette dernière, puis enlever le prisme, et la diriger sur la mire ; mais on préfère faire tourner le prisme autour d'une ligne verticale, et lui faire décrire deux angles droits : alors, en amenant la lunette sur l'image réfractée par le prisme dans cette nouvelle position, l'angle de la lunette dans ces deux positions est évidemment double de la déviation cherchée. Alors on ramène le prisme dans sa première position ainsi que la lunette, mais en faisant tourner le limbe de l'instrument ; on retourne de nouveau le prisme, et on fait marcher la lunette, le limbe étant fixe : l'arc décrit par la lunette est alors évidemment égal à quatre fois la déviation. En continuant ainsi, on mesurera un arc N, qui sera égal à $2n$ fois la déviation δ, et on aura $\delta = N : 2n$; les erreurs de lectures disparaissent quand n est très-grand, et les erreurs de pointage se compensent. Ces expériences donnent la déviation avec une très-grande précision. Mais cette déviation provient toujours de deux causes, du prisme gazeux et du défaut de parallélisme des surfaces des glaces qui forment le prisme ; mais comme les déviations dues à ces deux causes sont très-petites, l'effet total est égal à leur somme ; et pour avoir la déviation due au prisme de gaz, il suffit de retrancher de la déviation totale celle que produit le prisme plein d'air.

1251. M. Dulong a déterminé les rapports des puissances réfractives des gaz par une méthode susceptible d'une grande précision, que nous allons rapporter. Le procédé en question repose sur une loi constatée par MM. Biot et Arago, et que M. Dulong a vérifiée sur plusieurs gaz. Cette loi consiste en ce que, pour un même fluide élastique, la puissance réfractive est exactement proportionnelle à sa densité : or, comme il est très-facile d'augmenter ou de diminuer la densité d'un gaz, on pourra toujours l'amener à un degré tel que son action sur la lumière soit la même que celle de l'air atmosphérique, par exemple ; et si l'on détermine les densités du gaz et de l'air lorsque cette condition est remplie, il suffira d'une simple proportion pour déterminer le rapport des puissances réfractives quand les fluides posséderont la même force élastique ; d'où l'on déduira ensuite facilement le rapport des indices. En effet, supposons qu'un prisme creux puisse être à volonté rempli de différents gaz sous différentes pressions, et que la déviation soit la même quand le prisme est rempli d'air sous la pression p, ou d'un autre gaz sous la pression p', la température étant la même : alors l'indice de réfraction n' du gaz est égal à l'indice m de l'air ; et en désignant par n l'indice du gaz sous la pression p, on aura, en vertu de la loi énoncée, $n^2 - 1 : n'^2 - 1 :: p : p'$, puisque les densités des gaz sont proportionnelles aux pressions quand la température est constante. Mais comme $n' = m$, la propor-

Digitized by Google

tion précédente donne $n^2 - 1 = p\,(m^2 - 1) : p'$. Dans cette formule, n et m sont les indices de réfraction du gaz et de l'air sous la pression p, et à une certaine température; mais comme les quantités $n^2 - 1$ et $m^2 - 1$ varient proportionnellement à la densité, leur rapport est indépendant de la température et de la pression : ainsi la formule sera vraie pour la température 0° et pour la pression 0m,76; or dans ces circonstances on a trouvé $m = 1{,}000488$; par conséquent, on aura $n^2 - 1 = p\,(0{,}000488) : p''$.

L'appareil employé par M. Dulong se compose d'un prisme creux AB (*fig.* 768) formé d'un tube de verre épais AB, aux deux extrémités duquel sont ajustées deux glaces inclinées de 145° environ; la cavité du prisme communique par un tube de verre S avec un cylindre de même matière Z, de 1 mètre de longueur et d'un diamètre de 5 centimètres. Ce cylindre porte à chacune de ses extrémités une douille en fer verni. Celle qui est adaptée à l'extrémité inférieure est munie d'un robinet en fer G; l'autre porte trois tubes en fer destinés à établir une communication, l'une N avec le prisme; la deuxième O avec une machine pneumatique j, par un tuyau de plomb qui s'y adapte; la troisième M avec une cloche à robinet R, placée sur une cuve à mercure. Le prisme est attaché solidement sur un support EF, et placé de manière qu'une mire éloignée puisse être aperçue au travers. Le cylindre de verre Z, assujetti dans une situation verticale, peut être rempli de mercure par un petit tube latéral I, un peu plus long que le cylindre, et communiquant avec lui par la partie inférieure.

Cette disposition permet, comme on le voit, de faire le vide dans le prisme, d'y introduire ensuite un gaz quelconque, pourvu qu'il n'attaque pas le mercure; de le dilater à volonté par l'écoulement d'une quantité convenable de mercure, et enfin de mesurer à chaque instant son élasticité. M. Dulong s'est presque toujours servi pour ce dernier élément du baromètre U, adapté à la machine pneumatique. Quand le gaz était de nature à corroder la pompe, le robinet O restait fermé; on le faisait sortir par le robinet supérieur C, en produisant un courant de gaz hydrogène ou d'acide carbonique sous la cloche R. Dans ce cas, l'élasticité se mesurait par la différence de niveau du mercure dans les tubes Z et I.

Il eût été facile de disposer l'appareil de manière à permettre la compression du gaz qu'il devait contenir; mais comme il est assez difficile de s'opposer à la sortie d'un gaz comprimé, et que d'ailleurs la comparaison de deux gaz pouvait se faire avec autant de succès en dilatant celui qui possédait la plus grande puissance réfractive, ce dernier moyen a toujours été employé.

Pour constater l'égalité de puissance réfractive de deux gaz, il suffit de s'assurer que, sous la même incidence, la lumière éprouve la même déviation, quand elle traverse un espace successivement occupé par chacun de ces gaz, et terminé par deux plans d'une inclinaison constante; c'est à quoi l'on parvient à l'aide de la lunette astronomique X, munie de fils croisés au foyer de son objectif, et placée devant le prisme à une hauteur convenable, sur un pied susceptible de recevoir deux mouvements rectangulaires. Ce pied est solidement assujetti sur un massif de maçonnerie V dont les variations de hauteur, toujours extrêmement faibles et lentes par les changements de température, ne peuvent avoir d'influence. Le prisme étant ouvert, la lunette pointée sur la mire, on voit que, si les verres d'incidence et d'émergence avaient leurs faces extérieures et intérieures parallèles, il n'y aurait aucune déviation occasionnée par l'interposition du prisme; mais cette condition, qui serait impossible à satisfaire, n'est point nécessaire ici : les plans des plaques d'incidence et d'émergence peuvent même faire un angle quelconque, sans que les résultats des expériences en soient altérés.

Digitized by Google

Voici maintenant la manière d'opérer :

On commence d'abord par dessécher complétement toutes les surfaces intérieures de l'appareil, en y faisant passer un courant de gaz hydrogène sec; on y fait ensuite le vide, et on remplit le prisme d'air atmosphérique sec. Il existe pour cela un tube de verre *T* rempli de chlorure de calcium fondu, portant un robinet, et placé au-dessous de la platine de la machine pneumatique; on pointe alors la lunette sur la mire, à travers le prisme : l'appareil restant ouvert, l'élasticité de l'air est donnée par le baromètre. On fait une deuxième fois le vide, et, pour chasser les dernières portions d'air, on introduit une certaine quantité du gaz que l'on veut soumettre à l'observation; enfin on laisse écouler le gaz pur dans le prisme que l'on a vidé de nouveau, jusqu'à ce que la coïncidence de la mire avec le point de décussation des fils soit exactement rétablie. Si l'on a la précaution de faire écouler le gaz très-lentement, il est assez facile de saisir le moment où cette coïncidence est exacte; ou bien, après en avoir introduit une quantité excédante, on ouvre le robinet inférieur *G* jusqu'à ce que le gaz dilaté ait précisément la densité convenable pour réfracter autant que l'air : alors on mesure la hauteur de la colonne de mercure dans le baromètre *U* adapté à la machine pneumatique, ou la différence de niveau du liquide dans les tubes *Z* et *I*; et en retranchant l'une ou l'autre de la pression de l'atmosphère, au même moment, on a évidemment l'élasticité du gaz qui satisfait à la condition cherchée.

Pour le gaz hydrogène et le gaz oxygène, qui ont une puissance réfractive moindre que celle de l'air, au lieu de les comprimer pour leur faire acquérir une force de réfraction égale, il est préférable de suivre une marche inverse, c'est-à-dire de pointer la lunette lorsque le prisme est rempli de l'un de ces deux gaz sous la pression de l'atmosphère, et de dilater ensuite l'air jusqu'à ce que sa puissance réfractive soit réduite à celle du gaz.

Lorsque le fluide attaque le mercure, il faut modifier un peu la méthode d'observation. Le tuyau de communication du prisme avec le cylindre contenant le mercure est composé de trois parties (*fig.* 769). La pièce intermédiaire *LK* porte à sa partie supérieure une petite cuvette cylindrique qui laisse entre ses parois et le tuyau un espace annulaire; pareille disposition existe à l'extrémité supérieure du conduit *N*. Les diamètres de ces diverses parties sont combinés de telle façon que l'on peut enlever ou mettre cette pièce intermédiaire sans rien changer au reste de l'appareil.

Si l'on veut, par exemple, déterminer la puissance réfractive du chlore, on enlève le tuyau intermédiaire *LK*, et l'on ajuste à l'extrémité *S* un tube destiné à conduire hors du laboratoire l'excédant de gaz, qu'on introduit dans le prisme par l'orifice supérieur *D*. Lorsque la coïncidence de la mire avec les fils ne se dérange plus, ce qui indique que le gaz est pur, on fixe la lunette dans sa position; on chasse ensuite le chlore par un courant de gaz acide carbonique, puis on replace le tuyau *LK*, et l'on coule du mastic très-fusible dans les deux cuvettes *L* et *K*. Enfin, après avoir fermé l'orifice *D* par un petit bouchon de verre recouvert de cire molle, on fait le vide et l'on introduit dans le prisme un gaz dont la puissance réfractive soit supérieure à celle du chlore, par exemple du cyanogène; on détermine ensuite les puissances réfractives du chlore et du cyanogène comme précédemment, et, la mesure de la puissance de ce dernier étant connue, on rapporte celle du chlore à l'unité commune. Ce procédé exigeant un temps plus long, on ne doit le mettre en usage que dans les circonstances atmosphériques les plus favorables, c'est-à-dire vers le maximum de température du jour.

Il résulte des observations de MM. Biot et Arago, et de celles que M. Dulong a publiées récemment,

Digitized by Google

1° Que la puissance réfractive d'un gaz est exactement proportionnelle à sa densité ; une variation de température de 8° à 32° n'altère point cette loi ;

2° Les puissances réfractives des vapeurs suivent la même loi ;

3° La puissance réfractive d'un mélange de gaz et de vapeurs est égale à la somme des puissances réfractives des gaz et des vapeurs mêlées ;

4° La puissance réfractive d'un gaz composé n'a aucun rapport avec celles de ses éléments.

Les tableaux suivants renferment les puissances réfractives et les pouvoirs réfringents des principaux corps solides, liquides et gazeux.

Tableau des puissances réfractives et des pouvoirs réfringents de quelques corps solides et liquides.

NOMS DES SUBSTANCES.	INDICES DE RÉFRACTION.	PUISSANCES RÉFRACTIVES $n^2 - 1$.	DENSITÉ δ.	POUVOIRS RÉFRINGENTS $\frac{n^2-1}{\delta}$
Sulfate de barite . . .	23 à 14	1,699	4,27	0,3979
Verre d'antimoine . . .	17 à 9	2,568	5,28	0,4864
Chaux sulfatée	61 à 41	1,213	2,252	0,5386
Verre commun	31 à 20	1,4025	2,58	0,5456
Cristal de roche. . . .	25 à 16	1,445	2,65	0,5456
Chaux carbonatée . . .	5 à 3	1,778	2,72	0,6536
Sel gemme	17 à 11	1,388	2,143	0,6477
Alun	35 à 24	1,1267	1,714	0,6570
Borax.	22 à 15	1,1511	1,714	0,6716
Nitrate de potasse . . .	32 à 21	1,345	1,9	0,7079
Sulfate de fer	303 à 200	1,295	1,715	0,7551
Acide sulfurique . . .	10 à 7	1,041	1,7	0,6124
Eau de pluie	529 à 396	0,7845	1,0	0,7845
Gomme arabique . . .	31 à 21	1,179	1,375	0,8574
Alcool rectifié	100 à 73	0,8765	0,866	1,0121
Camphre.	5 à 2	1,25	0,996	1,2551
Huile d'olive.	22 à 15	1,1511	0,913	1,2607
Huile de lin	40 à 27	1,1948	0,932	1,2819
Essence de térébenthine .	25 à 17	1,1626	0,874	1,3222
Ambre	14 à 9	1,42	1,04	1,3654
Diamant	100 à 41	4,949	3,4	1,4556

Digitized by Google

Tableau des indices de réfraction et des puissances réfractives des gaz à 0° et sous la pression de 0m,76.

NOMS DES GAZ.	INDICES DE RÉFRACTION n.	PUISSANCES RÉFRACTIVES $n^2 - 1$.	DENSITÉ δ.
Air atmosphérique	1,000294	0,000589	1,000
Oxygène	1,000272	0,000544	1,103
Hydrogène	1,000138	0,000277	0,068
Azote	1,000300	0,000601	0,976
Ammoniaque	1,000385	0,000771	0,591
Acide carbonique	1,000449	1,000899	1,524
Chlore	1,000772	0,001545	2,476
Acide hydro-chlorique	1,000449	0,000899	1,254
Oxyde d'azote	1,000503	0,001007	1,527
Gaz nitreux	1,000303	0,000606	1,039
Oxyde de carbone	1,000340	0,000681	1,992
Cyanogène	1,000834	0,001668	1,818
Gaz oléfiant	1,000678	0,001356	0,980
Gaz des marais	1,000443	0,000886	0,559
Éther muriatique	1,001095	0,002191	2,234
Acide hydro-cyanique	1,000451	0,000903	0,944
Gaz oxy-chloro-carbonique	1,001159	0,002318	3,442
Acide sulfureux	1,000665	0,001331	2,247
Hydrogène sulfuré	1,000644	0,001288	1,178
Éther sulfurique	1,00153	0,003061	2,580
Soufre carburé	1,01500	0,003010	2,644
Hydrogène proto-phosphoré	1,000389	0,001379	1,256

Décomposition de la lumière par réfraction.

1252. Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que la lumière n'éprouvait dans la réfraction aucune autre altération que sa déviation; mais il n'en est pas ainsi: un rayon de lumière blanche qui traverse un prisme en sort dilaté et coloré. Ce phénomène porte le nom de *dispersion;* nous verrons bientôt à quoi il faut l'attribuer. Le faisceau réfracté est en général d'autant plus dispersé que la puissance réfractive de la substance est plus considérable: pour les gaz, la dispersion est peu sensible; mais pour les substances solides ou liquides, les rayons colorés sont très-écartés. Dans les tables précédentes, les indices sont relatifs au rayon jaune qui occupe le milieu du faisceau.

Pour reconnaître la dispersion et la coloration qui accompagnent toujours la réfraction, lorsque la surface d'émergence n'est point parallèle à la surface d'incidence, imaginons qu'on ait pratiqué au volet d'une chambre obscure une ouverture d'un très-petit diamètre, par laquelle s'introduise un faisceau délié de rayons solaires. Si on reçoit le faisceau sur un prisme de verre blanc bien transparent, et le faisceau réfracté sur un carton blanc, on observe 1° que l'image (*fig.* 770), nommée *spectre,* est allongée perpendiculairement aux arêtes parallèles du prisme; 2° qu'elle est terminée par deux lignes droites parallèles et par deux demi-cercles; 3° que toute la

Digitized by Google

surface de l'image est formée de bandes parallèles entre elles et aux arêtes des prismes, et colorées des teintes les plus brillantes. L'extrémité la plus voisine de l'angle réfringent du prisme est d'un rouge vif; l'extrémité opposée est violette.

Si on observe des spectres formés par des prismes de différentes substances incolores, de même angle et dans la même position, on reconnaît que les couleurs se succèdent toujours dans le même ordre, mais qu'elles n'occupent pas dans le spectre des espaces proportionnels. Ainsi, par exemple, un prisme de flintglass (verre renfermant du plomb) donne proportionnellement beaucoup plus de violet et beaucoup moins de rouge qu'un prisme de crown-glass (verre ordinaire).

Le nombre des teintes intermédiaires entre le rouge et le violet qui forment les extrémités des spectres est infini; mais on est convenu d'en prendre quelques-unes pour termes de comparaison. Ces teintes se succèdent dans l'ordre suivant : *rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet*. Dans l'image solaire, ces couleurs passent de l'une à l'autre d'une manière continue par une infinité de nuances intermédiaires. On peut obtenir un spectre dans lequel les teintes sont assez bien séparées en faisant entrer les rayons solaires par un orifice d'un centimètre de diamètre, recevant le faisceau sur un prisme d'un angle réfringent de 60°, et plaçant l'écran à six mètres de distance.

Lorsque l'on veut observer quelque temps ce phénomène, comme le mouvement du soleil change à chaque instant la direction du faisceau incident, on est obligé de déplacer souvent la lentille, le prisme et le carton qui reçoit le spectre. Pour éviter cet inconvénient, on reçoit extérieurement le rayon solaire sur un miroir métallique dont on fait varier la position, de manière à avoir un rayon réfléchi de direction constante; cette variation peut s'obtenir à l'aide de deux mouvements rectangulaires qu'on dirige à la main de l'intérieur de la chambre, ou par un mouvement d'horlogerie : l'appareil porte alors le nom d'*héliostat*. Nous l'examinerons plus tard.

Toutes les lumières artificielles que nous pouvons produire donnent des spectres analogues à celui qui est produit par les rayons solaires; mais les couleurs sont moins vives, et dans toutes il manque certaines couleurs; cependant, celles qui s'y trouvent sont disposées dans le même ordre que dans le spectre solaire.

1253. Les observations que nous avons faites sur le spectre solaire s'expliquent très-bien en supposant que les rayons de lumière blanche soient formés de rayons parallèles, jouissant individuellement de la propriété de produire la sensation d'une couleur déterminée, et ensemble de celle de produire la sensation de la lumière blanche; et qui, ayant des réfrangibilités différentes, sont séparés par tous les corps diaphanes dont les faces d'incidence et d'émergence ne sont point parallèles. Mais pour que cette hypothèse puisse être admise, il faut reconnaître 1° que l'allongement du spectre solaire ne peut pas être produit par la dispersion de rayons également réfrangibles; 2° que les rayons colorés ont individuellement des réfrangibilités différentes; et 3° enfin que la réunion des rayons colorés produit réellement de la lumière blanche.

1254. Pour reconnaître l'altération qu'éprouve dans ses dimensions un faisceau de lumière homogène, c'est-à-dire dont tous les rayons sont également réfrangibles lorsqu'il traverse un prisme, considérons (*fig.* 771) un prisme dont les arêtes sont horizontales, et un faisceau de lumière partant d'un point *o* et formant un cône droit dont l'axe est dans un plan perpendiculaire aux arêtes du prisme. Je dis d'abord que les rayons incidents et émergents correspondants sont également inclinés sur un plan perpendiculaire aux arêtes du prisme : en effet, nous verrons plus tard que la vitesse de la lumière est toujours la même dans le même milieu; et, comme les composantes de la vitesse du rayon incident et du rayon émergent, parallèlement aux arêtes du prisme sont nécessairement égales, attendu que le prisme est symétrique par

Digitized by Google

rapport à cette direction, et qu'il n'y a pas de raison pour que ces composantes soient altérées plutôt dans un sens que dans l'autre, il s'ensuit nécessairement que le rayon incident et le rayon émergent sont également inclinés sur la section principale. On conçoit d'ailleurs facilement qu'un prisme ne produit pas de déviation parallèlement à ses arêtes, ce que l'on peut vérifier par l'expérience : car, lorsqu'on regarde un corps à travers un prisme, les dimensions du corps parallèles aux arêtes n'éprouvent point d'altération, quelle que soit la position du prisme. Ainsi, les rayons incidents dirigés dans le méridien parallèle aux arêtes du prisme donneront deux rayons émergents qui feront entre eux un angle égal à l'angle du cône incident. Voyons maintenant ce qui arrivera aux rayons incidents dirigés suivant la section principale du prisme : on a évidemment $o = i - i'$, et $k = r' - r$, et on aura $o = k$ quand on aura en même temps $i = r'$ et $i' = r$, ce qui pourra toujours avoir lieu quand le cône incident contiendra le rayon de minimum de déviation qui passe par le point o, rayon qui, lorsque l'angle o est très-petit, coïncide sensiblement avec son axe. Il résulte de là que, si l'axe du faisceau incident à la direction du rayon de minimum de déviation, et si on reçoit le faisceau émergent sur un écran, les rayons qui formeront les extrémités du diamètre horizontal seront inclinés entre eux de la même quantité que ceux qui forment les extrémités du diamètre vertical, et cet angle sera égal à l'angle au sommet du cône incident; et par conséquent, si les points de rencontre des rayons qui forment les extrémités des deux diamètres étaient à la même distance de l'écran, les deux diamètres seraient égaux. Il n'en est point ainsi, à cause de l'inégalité de divergence des rayons dans l'intérieur du prisme parallèlement et perpendiculairement à la section principale; mais, les distances des points de rencontre étant peu différentes, il n'en résultera qu'une petite différence dans les diamètres, différence qui sera une fraction d'autant plus petite du diamètre moyen que l'écran sera plus éloigné : ainsi, en recevant l'image sur un écran, placé à une grande distance du prisme, l'image sera sensiblement circulaire. Mais, si le faisceau incident n'avait pas sur la surface du prisme l'inclinaison que nous avons supposée, le diamètre horizontal de l'image serait le même, et le diamètre vertical serait plus grand ou plus petit, suivant le sens dans lequel l'inclinaison du faisceau incident aurait varié. En effet, soit pkp' (*fig.* 772) le faisceau émergent correspondant à la position o' du faisceau incident, qk' et $q'k'$ des lignes parallèles aux rayons émergents correspondants à la position o'' du faisceau incident, on a $D - D' = k$ et $k' = D - a - (D' - a') = k + a' - a$; ainsi le diamètre vertical de la seconde image sera plus grand que celui de la première, si a' est plus grand que a, et il sera plus petit dans le cas contraire; mais a est la variation de déviation qu'éprouve le rayon incident supérieur, lorsque le faisceau incident passe de la position o' à la position o'', et a' est la variation de déviation du rayon inférieur; mais, les angles o' et o'' étant les mêmes, le rayon supérieur et le rayon inférieur du faisceau incident éprouvent la même variation d'incidence quand le faisceau passe de o' en o'' : par conséquent a et a' sont les variations de déviations correspondantes à des variations égales d'incidence; mais, à partir du minimum de déviation, les accroissements de déviation pour des accroissements ou des décroissements égaux de l'angle d'incidence vont en augmentant, par conséquent a sera plus grand que a' si le rayon supérieur est plus écarté de la direction de minimum de déviation que le rayon inférieur, et ce sera le contraire s'il l'est moins. Or il est facile de voir que, quand le faisceau se rapproche du sommet du prisme, les rayons inférieurs sont plus écartés de la direction de la déviation minimum que les rayons supérieurs : par conséquent a' est $>$ que a, et c'est le contraire quand le point o se rapproche de la base du prisme; ainsi, dans le premier cas le diamètre vertical de l'image s'allonge, et dans le second il se raccourcit.

Si les rayons du faisceau réfracté marchaient en sens contraire, les rayons sortiraient du prisme dans la direction des rayons incidents : ainsi l'œil, étant placé au point de convergence des rayons, verrait une image circulaire; mais, si le faisceau incident avait une section circulaire dans la position où il devrait être aplati pour paraître circulaire, l'image serait évidemment allongée, et elle serait aplatie quand le faisceau, pour donner une image circulaire, devrait être allongé. Ces dernières conséquences de la théorie peuvent facilement être vérifiées par l'expérience : si on regarde un corps sphérique placé à une petite distance du prisme, dans la position du minimum de déviation, l'image est sensiblement circulaire; mais, si on tourne le prisme de manière à rapprocher de l'œil l'angle réfringent du prisme, l'image s'aplatit, et, en le tournant en sens contraire, l'image s'allonge. Il résulte évidemment de ce que nous

Digitized by Google

venons de dire, que l'allongement du spectre solaire dans la position du minimum de déviation est incompatible avec l'égale réfrangibilité des rayons.

1255. Pour constater l'inégalité de réfrangibilité des rayons, recevons le spectre sur un carton percé d'un trou correspondant au centre d'une certaine bande colorée (*fig.* 773); le faisceau de rayons colorés qui passera au travers sera isolé du reste des rayons et pourra être examiné séparément. En lui faisant traverser un second prisme *EFD*, on remarque que sa teinte reste constante; et, si en traversant ce second prisme l'incidence est égale à l'émergence, son image directe est égale à son image réfractée, ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que l'indice de réfraction est le même pour tous les rayons qui le composent. En recueillant ces rayons sur une lentille, ils se réunissent en un seul foyer, d'où l'on doit conclure encore que tous les rayons qui le composent sont également réfringents. Si on pratique sur le carton *MN* qui reçoit le spectre une seconde ouverture correspondante au centre d'une autre bande colorée, le nouveau rayon, en passant à travers ce second prisme, se comportera comme le premier; mais, en examinant la position des deux images après la seconde réfraction, on reconnaît facilement que les rayons qui les ont produites ont des réfrangibilités différentes, car la distance des images est plus grande que celle qui résulterait de l'égale réfrangibilité des rayons.

On peut encore faire l'expérience d'une manière plus concluante et plus facile à exécuter. Si on reçoit le faisceau de lumière sur un prisme dont les arêtes soient horizontales, on obtiendra un spectre *MN* (*fig.* 773 *A*) allongé verticalement, et dans lequel le rouge occupera la partie supérieure si l'angle réfringent du prisme est placé en haut: si alors on place derrière ce prisme un autre prisme dont les arêtes soient verticales, tous les rayons seront déviés horizontalement, et on obtiendrait un spectre parallèle au premier si tous les rayons étaient également réfrangibles; mais on obtient un spectre *M'N'* incliné dans le sens indiqué par la figure, ce qui démontre évidemment que la réfrangibilité des rayons croît depuis le rouge jusqu'au violet.

On peut encore vérifier ces inégalités de réfrangibilité en traçant sur un carton noir et sur la même ligne des bandes de même hauteur et de différentes couleurs: en les regardant à travers un prisme on les voit inégalement élevées.

On peut encore démontrer l'inégale réfrangibilité des différents rayons colorés d'une autre manière. Nous avons vu (1231) que, quand un rayon de lumière se présentait pour sortir d'un milieu réfringent pour passer dans le vide ou dans un corps moins réfringent, le rayon se réfléchissait complétement quand le sinus de l'angle d'incidence dépassait $\frac{1}{n}$: or, si les rayons colorés sont inégalement réfrangibles, les angles sous lesquels la réflexion totale commencera seront différents pour chacun d'eux; par exemple, le rayon violet, étant le plus réfrangible, commencera à se réfléchir sous un plus petit angle que le rayon rouge, qui l'est le moins. Newton a vérifié ce fait par l'expérience suivante: il fit tomber un trait de lumière solaire dans une chambre obscure, perpendiculairement à la face *AC* (*fig.* 774) d'un prisme *BAC*, dont les angles *B* et *C* étaient de 45°; le rayon arrivé en *I* se divisa en deux parties; l'une fut réfléchie et sortit par la face *AB* sans éprouver de dispersion sensible, tandis que l'autre partie fut réfractée au point *I* et forma sur un carton le spectre *mn*. Le rayon réfléchi fut reçu après son émergence sur le prisme *abc*, et forma un autre spectre *m'n'*; alors, en faisant tourner le prisme *ABC* de manière à augmenter l'angle d'incidence sur la surface *BC*, il remarqua que la partie violette diminuait dans le spectre *mn* et augmentait dans le spectre *m'n'*, et que toutes les couleurs s'affaiblissaient successivement dans le spectre *mn* et se renforçaient dans le

Digitized by Google

spectre *m'n'*, suivant l'ordre violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge; ce qui s'accorde parfaitement avec ce que nous avons annoncé.

Ainsi chaque rayon coloré conserve sa teinte par la réfraction, sa réfrangibilité est constante pour le même corps, et dans les mêmes circonstances les réfrangibilités des rayons différents sont inégales; et, comme dans les spectres formés par toutes les substances réfringentes la succession des teintes est la même, il en résulte que le rayon violet est le plus réfrangible, le rayon rouge celui qui l'est le moins, et qu'entre ces deux limites la réfrangibilité des rayons varie d'une manière continue. Mais les rapports des réfrangibilités des différents rayons ne sont pas les mêmes pour tous les corps, comme nous le verrons lorsqu'il sera question de l'achromatisme.

1256. Reste enfin à reconnaître si la réunion de tous les rayons séparés par un prisme peut produire de la lumière blanche. Pour cela recevons le spectre sur une lentille : chaque système de rayons ayant une réfrangibilité différente formera un foyer séparé, et il y aura par conséquent sur l'axe de la lentille une suite de foyers distincts, mais qui seront peu éloignés les uns des autres, car les réfrangibilités diffèrent peu. Si on place dans le lieu des foyers un miroir métallique oblique à l'axe, il réfléchira régulièrement les rayons appartenant à chaque cône réfracté, et il paraîtra coloré d'une teinte qui variera avec la position de l'œil; mais si on y place un carton, une feuille de papier ou un corps non poli, la réflexion diffuse des rayons les mêlera, et on n'apercevra qu'une image blanche légèrement colorée sur ses bords. Pour rendre encore plus évident que c'est bien la sensation simultanée de tous les rayons qui produit la lumière blanche, on prend un carton découpé (*fig.* 775) que l'on fait mouvoir devant le spectre solaire de manière à intercepter successivement différentes bandes colorées : alors l'écran placé au foyer de la lentille prend différentes nuances qui dépendent de celles des rayons interceptés; mais si on fait mouvoir rapidement le carton, l'image du foyer devient blanche. Ici les sensations des différentes couleurs sont réellement successives; mais comme la sensation dans l'organe a une certaine durée, cette dernière étant plus grande que le temps total de leur succession, l'effet produit est le même que si elles étaient simultanées.

On peut encore réformer la lumière blanche en rendant les rayons colorés parallèles : il suffit pour cela de regarder le spectre (*fig.* 776) avec un prisme de même matière, d'un angle réfringent égal et placé d'une manière symétrique; les rayons, se trouvant dans des circonstances inverses de celles qui les ont séparés, redeviendront parallèles et produiront de la lumière blanche; c'est ce qu'on observe en effet. La recomposition de la lumière blanche par des réfractions égales et opposées n'exige pas que les deux prismes aient des angles parfaitement égaux : on peut parvenir à ramener les rayons au parallélisme, quel que soit le prisme dont on fait usage, pourvu qu'il ne soit pas extrêmement différent du premier, et on peut toujours trouver une infinité de positions telles qu'il recompose la lumière réfléchie par le spectre. En effet, si on place le prisme de manière qu'il soit en sens contraire du premier, à une petite distance du tableau, les rayons émanés du spectre, et qui arriveront à l'œil, formeront une image du spectre moins allongée, parce que la réfraction inclinera les rayons émergents vers la base du prisme, et que cette déviation sera plus grande pour les rayons violets que pour les rayons rouges; à une certaine distance l'image deviendra parfaitement blanche, et cela arrivera quand la dispersion dans le prisme pour des rayons parallèles sera égale à la convergence des rayons incidents; au delà de cette distance on verrait un spectre en sens contraire. On se rendra compte d'une manière plus simple du fait dont il est question en remarquant que, si le second prisme était assez éloigné du spectre pour que les rayons qui en émanent pour arriver à l'œil à travers le prisme pussent être considérés comme parallèles, l'œil verrait un spectre

Digitized by Google

opposé à celui que forme le premier prisme, et que, si on rapproche le prisme, les rayons étant convergents, l'étendue du spectre primitif sera seulement diminuée : à une certaine distance il devra donc disparaître.

Il est facile de déduire de ce qui précède que, quand un faisceau de lumière blanche ou colorée traverse un corps diaphane terminé par des faces parallèles, la lumière éprouve une décomposition en pénétrant dans le corps et une recomposition en en sortant.

1257. *Conditions pour former un spectre dont les teintes soient homogènes.* Pour que les différentes bandes colorées obtenues par la décomposition de la lumière à travers un prisme soient homogènes, il y a plusieurs précautions à prendre, que nous allons successivement examiner.

1° Le rayon de lumière doit avoir de très-petites dimensions, et l'écran doit être placé à une grande distance. En effet, considérons un faisceau de rayons parallèles *ABab* (*fig.* 777) : les rayons extrêmes *AB* et *ab* donneront les faisceaux divergents *CDGH* et *cdgh*, dans lesquels les rayons de même couleur seront parallèles; le rayon rouge *DH* coupera le rayon violet *cg* en un point *F*. Si maintenant nous imaginons que le faisceau coloré *CGDH* se meuve parallèlement à lui-même jusqu'à ce qu'il vienne coïncider avec le faisceau *cdgh*, il est évident que, par un point quelconque de l'espace *DFc*, il passera successivement un rayon de toutes les couleurs : or, comme toutes les positions que nous avons supposé que prenait successivement le faisceau sont occupées simultanément par des faisceaux émergents dans l'espace *cD*, il s'ensuit que par tous les points de l'espace *DFc* il passe un rayon de toutes les couleurs, et par conséquent que cet espace est blanc. Ainsi, si on place un écran en avant du point *F*, par exemple dans la position *Kl*, on aura deux spectres *KL* et *kl*, séparés par une bande blanche *Lk* ; mais, si l'écran est placé au delà du point *F*, on n'obtiendra qu'un seul spectre *Gh*, qui sera d'autant plus étendu et dans lequel les bandes colorées seront d'autant plus homogènes que l'écran sera plus éloigné du prisme. L'accroissement de dimensions du spectre à mesure que l'écran s'éloigne est évident ; quant à la séparation des bandes colorées dans les mêmes circonstances, il suffit de remarquer que chaque bande colorée occupe toujours la même étendue sur l'écran, quelle que soit sa position ; par exemple, les rayons violets sont tous renfermés entre *CG* et *cg*; et tous les rayons rouges entre *DH* et *dh* : par conséquent ces bandes seront d'autant plus espacées que l'écran sera plus éloigné. Le même effet peut être obtenu sur un écran placé à une distance constante du prisme en diminuant l'étendue du faisceau incident : en effet chaque spectre d'une même teinte varie proportionnellement au diamètre du faisceau incident, et l'étendue totale du spectre entier diminue dans un plus petit rapport, car il est toujours égal au diamètre d'un des spectres élémentaires, augmenté d'une quantité constante, égale à la dispersion d'un pinceau très-délié. Par exemple, si le faisceau *ABab* prenait un diamètre deux fois plus petit, le faisceau réfracté serait *CGMX* ; le spectre qui était primitivement *Gh* se trouverait réduit à *Gx*, plus grand que 1/2 *Gh*, et chaque spectre élémentaire d'une seule teinte aurait pour largeur *Gt*, égal à la moitié de *Gg*, largeur des mêmes spectres quand le faisceau incident était double.

2° Le corps éclairant doit avoir un très-petit diamètre apparent. En effet, soient *P* (*fig.* 778) le soleil, *MN* un écran percé d'un très-petit orifice *o*, et *ABC* un prisme que nous supposerons incliné de manière à produire le minimum de déviation : en ne considérant que les rayons violets du soleil, le spectre qu'ils formeront sera un cercle *vv'*, les rayons rouges formeront un autre spectre circulaire *rr'*, et les spectres de toutes les autres teintes seront des cercles compris entre ceux-là, et empiéteront plus ou moins sur chacun d'eux, comme on le voit (*fig.* 779). Si nous supposons que

Digitized by Google

le diamètre apparent du soleil diminue, le centre de chaque spectre élémentaire ne changera pas, parce qu'il est le lieu du rayon émergent correspondant au rayon incident passant par le centre du soleil ; mais le diamètre de chacun d'eux diminuera, ils se recouvriront moins, et par conséquent chaque teinte sera plus homogène. En désignant par l la longueur du spectre dans la position du prisme qui donne le minimum de déviation, et par r le rayon des cercles de différentes teintes, en supposant les centres également espacés, le nombre des cercles qui passent par un même point est égal au nombre des centres qui se trouvent à une distance plus petite que r de chaque côté de ce point ; et ce nombre est évidemment proportionnel à $\frac{2r}{l-2r}$, puisque tous les centres sont distribués sur la longueur $l - 2r$. Ainsi, en un point quelconque placé à une distance plus grande que $2r$ des extrémités du spectre, le mélange des couleurs est au mélange des rayons dans la lumière blanche comme $2r : l-2r$. Cette relation exige nécessairement que $l - 2r$ soit plus grand que $2r$, ce qui a toujours lieu.

En outre, quand le corps éclairant a des dimensions appréciables, chaque image colorée est environnée d'une pénombre d'autant plus large que le diamètre apparent du corps est plus grand, et la superposition de ces pénombres rend très-vagues les contours du spectre. Ainsi, sous tous les rapports, il est important de ne faire arriver sur le prisme qu'un faisceau très-délié de lumière formé de rayons sensiblement parallèles.

On peut parvenir de plusieurs manières différentes à diminuer la divergence des rayons incidents du soleil : on pourrait d'abord recevoir un faisceau à travers une très-petite ouverture A (*fig.* 780), et recevoir le cône de rayons divergents sur un autre écran percé d'une très-petite ouverture B, pour ne laisser passer qu'une partie de l'image du soleil. La divergence de ces rayons sera évidemment plus petite que celle des rayons qui passent par l'orifice A, dans le rapport du diamètre de l'image du soleil sur l'écran PQ au diamètre de l'orifice. On pourrait substituer au soleil son image formée au foyer d'une lentille convexe d'un court foyer ; cette image aurait un très-petit diamètre relativement à celle du soleil, et on placerait derrière la lentille un écran percé d'un très-petit trou destiné à ne transmettre au prisme qu'un faisceau très-délié des rayons émanés du foyer. Mais il est facile de voir que par ce dernier moyen on ne gagnerait rien en intensité : car la divergence des rayons au delà du foyer augmente proportionnellement à la concentration de ces rayons au foyer, et serait exactement la même que si les rayons traversaient directement un premier orifice d'un diamètre égal à celui de l'image focale. Ainsi le premier moyen, étant le plus simple, doit toujours être employé de préférence ; il est même avantageux de recevoir sur le prisme un faisceau qui a traversé une fente étroite parallèle aux arêtes du prisme : le spectre est plus large, et les teintes sont aussi séparées que s'il était plus étroit. On peut d'ailleurs, dans tous les cas, espacer davantage les teintes en recevant le spectre sur des écrans inclinés sur le faisceau émergent. Pour obtenir un spectre très-lumineux on pourrait placer dans le volet une lentille d'un très-long foyer, le prisme dans le faisceau émergent et l'écran au foyer : le spectre serait très-étroit, les teintes très-brillantes et bien séparées.

3° Enfin une dernière cause, et certainement une des plus influentes du mélange des couleurs du spectre solaire, réside dans les veines et les stries du prisme, qui dispersent irrégulièrement la lumière. Quand on n'a pas de prisme d'une pureté suffisante, on peut employer des prismes creux en glaces, remplis d'un liquide très-dispersif.

1258. ***Explication de différents phénomènes.*** La recomposition de la lumière par le parallélisme des rayons explique d'une manière très-simple les apparences

Digitized by Google

singulières que présente un prisme équilatéral sur lequel on fait arriver un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure.

Soient *MNP* (*fig.* 781) un prisme équilatéral, *SI* un rayon solaire dans la position du minimum de déviation pour les rayons moyens, et à peu près au tiers du côté *MN*. Les rayons réfractés à travers le prisme donnent naissance à trois spectres colorés provenant de rayons émergents par chacune des faces du prisme, et à trois images blanches et circulaires du soleil provenant également chacune d'une des faces du prisme. Pour rendre compte de ce phénomène, rappelons-nous d'abord que, quand un rayon dispersé à la première surface d'un corps réfringent se présente à sa seconde surface, la dispersion disparaît après l'émergence quand la seconde surface est parallèle à la première; mais, quand le rayon éprouve des réflexions intérieures, cette condition n'est point nécessaire, et les rayons émergents redeviennent parallèles toutes les fois qu'ils rencontrent une face sous un angle égal à l'angle moyen de réfraction, et que l'angle obtus est dirigé du côté des rayons qui étaient du côté de l'angle aigu à l'entrée du faisceau dans le corps : car il est facile de voir que l'effet du parallélisme des faces se réduit à satisfaire à ces deux conditions. Cela posé, le rayon *SI* se divisera au point *I* en deux parties : l'une sera réfléchie et formera un spectre *B*, l'autre sera réfracté suivant *II'*; au point *I'* le rayon se divisera encore, une partie sortira pour former le spectre *C*, l'autre sera réfléchie suivant *I'I''*; au point *I''* une nouvelle division du rayon donnera le spectre *B'* et le rayon réfléchi *I''I'''*, qui produira le nouveau spectre *C'* et le rayon *I'''I^iv*; ce dernier donnera un spectre *B''* et un rayon *I^iv I^v*; enfin ce dernier rayon donnera le spectre *C''* et le rayon réfléchi *I^v I*, qui se réunira au rayon qui pénètre dans le prisme. Or il est facile de voir que les spectres *B*, *B'*, *B''*, seront blancs, et que les spectres *C*, *C'* *C''*, seront colorés : car les rayons rencontrent toujours les faces du prisme sous des angles égaux entre eux et à l'angle moyen de réfraction du rayon incident; mais ce n'est qu'aux points *I''* et *I^iv* que le rayon rouge est du côté de l'angle obtus.

1259. Il résulte de ce qui précède que, si, au lieu de recevoir le rayon solaire sur un prisme, on le recevait sur une lentille *MN* (*fig.* 782), les rayons dispersés par la lentille formeraient leur foyer séparément, et à des distances d'autant plus grandes de la lentille que les rayons seraient moins réfrangibles : ainsi le foyer des rayons violets serait en *V*, et celui des rayons rouges en *R*; les rayons des différentes couleurs seraient alors compris dans des cônes ayant une même base, et leur sommet de *V* en *R*. Si on reçoit l'image réfractée sur un carton blanc, placé entre *V* et la lentille, le cône intérieur donnera une image blanche, puisque ce cône renferme des rayons de toutes les couleurs; mais au delà de cette image blanche, il y aura des anneaux colorés concentriques, dans lesquels le violet, l'indigo, le bleu, etc., manqueront successivement : la gradation des teintes sera par conséquent différente de celle que présente le spectre formé par un seul prisme. A mesure que le carton s'approchera du point *V*, l'image blanche ira en diminuant; quand il sera placé en *V*, elle aura disparu et le centre sera occupé par le foyer des rayons violets; de *V* en *R* il n'y aura point de blanc, et les couleurs changeront de place; au delà du point *R* l'intersection de l'écran par le cône *R'RR'* donnera une image blanche, et dans les anneaux colorés qui l'environneront la première couleur qui manquera sera le rouge et la dernière le violet. Il est évident que, si on plaçait en *tt'* un écran circulaire ayant un diamètre peu différent de celui du cône des rayons rouges en ce point, on obtiendrait sur le tableau un anneau de rouge pur, et que, si on le plaçait en *t''t'''*, on obtiendrait au contraire un anneau violet.

1260. A l'aide du fait bien constaté de l'inégale réfrangibilité des rayons de différentes couleurs, nous pouvons expliquer un grand nombre de phénomènes que

Digitized by Google

présente la vision des corps à travers des prismes. Supposons d'abord que sur une feuille de papier noir on place sur la même ligne horizontale deux petites bandes de papier, l'une peinte en rouge, l'autre en violet. Si on les regarde à travers un prisme dont les arêtes soient horizontales, les deux images ne seront plus placées sur le prolongement l'une de l'autre : l'image violette, ayant éprouvé une plus grande déviation que l'autre, sera plus relevée du côté du sommet de l'angle réfringent du prisme. Si on colore une bande mince de papier en rouge et en violet, en la regardant à travers un prisme dans les mêmes circonstances que précédemment, on voit deux images, l'une rouge, l'autre violette, et cette dernière est plus déviée que l'autre. Si on place sur un fond noir un petit carré de papier blanc, il se formera une infinité d'images colorées, ayant des teintes qui se succèdent de la même manière que dans le spectre solaire, et qui seront d'autant plus déviées que les rayons correspondants auront un plus grand pouvoir réfringent. Si l'angle réfringent du prisme est au-dessus de l'œil, l'image violette sera la plus élevée et l'image rouge la plus basse; mais, ces images se superposant dans une partie de leur étendue, l'image totale paraîtra blanche dans le lieu de la coïncidence, et elle sera bordée supérieurement par une frange bleue et violette, et inférieurement par une frange jaune et rouge. Si on regarde avec le prisme une tache noire sur un fond blanc, les franges sont de même couleur, mais leurs places sont changées ; c'est-à-dire, si le sommet du prisme est au-dessus de l'œil, les franges violettes sont à la partie inférieure du corps et les franges rouges à la partie supérieure, parce que les franges sont produites par le blanc qui environne le corps noir.

1261. *Teintes composées produites par les mélanges des couleurs simples.* Nous avons vu, dans ce qui précède, que chaque rayon simple ne se divisait plus, et avait une teinte variable comprise entre les deux limites extrêmes, le rouge et le violet. Cependant, en observant ce qui se passe sur la palette du peintre, où il obtient toutes les nuances par le mélange d'un petit nombre de couleurs, plusieurs physiciens avaient pensé que la même chose avait lieu pour certaines couleurs du spectre solaire, par exemple que le violet était un mélange de rayons rouges et bleus, le vert un mélange de rayons bleus et jaunes, etc.; mais il n'en est pas ainsi. A la vérité, chaque bande colorée du spectre renferme une plus ou moins grande quantité de rayons des tranches voisines; mais, en purifiant un des rayons du spectre par une nouvelle réfraction, on obtient des rayons parfaitement simples qui affectent toutes les couleurs.

1262. Tous les corps colorés que nous offre la nature, même les fleurs dont les teintes sont souvent si vives, n'envoient jamais à l'œil des rayons simples : car, si on les regarde à travers un prisme, on voit leur image bordée de franges de différentes couleurs. Les franges ne se manifestent que vers les bords, parce que les bandes colorées qui proviennent des points intérieurs, étant superposées, se neutralisent, donnent la teinte générale du corps, et par conséquent celles des points extrêmes, étant les seules isolées, sont les seules visibles.

1263. Newton a fait beaucoup d'essais pour former une teinte blanche en mêlant des poudres colorées, mais il n'a jamais pu obtenir qu'une teinte grisâtre : la raison en est que, ces poudres absorbant toutes une grande quantité de lumière blanche, on doit obtenir une teinte semblable à celle qui proviendrait d'un mélange de blanc et de noir.

1264. Newton appelle couleurs *complémentaires* celles qui, étant réunies, forment de la lumière blanche. Pour obtenir la couleur complémentaire d'une teinte quelconque, Newton a donné la règle suivante : ayant décrit du point C (*fig.* 783), comme centre, un cercle dont le rayon soit égal à l'unité, et divisé sa circonférence

Digitized by Google

en sept parties proportionnelles aux nombres 1/9, 1/16, 1/10, 1/9, 1/10, 1/16, 1/9, si on considère les différents secteurs comme représentant les sept couleurs principales du spectre, et si l'on place aux points *r*, *o*, *j*, *v*, *b*, *i*, *u*, qui sont les centres de gravité des arcs de cercles, des poids proportionnels aux longueurs de ces arcs, le centre de gravité total passera par le point *C*, et ce sera le cas de la blancheur parfaite que produit la sensation simultanée de toutes les nuances, lorsqu'elles sont mélangées dans les proportions où elles se trouvent naturellement dans le spectre. Mais, si nous supposons les proportions altérées, il faudra placer sur chaque centre de gravité des poids qui ne seront plus dans le rapport des arcs : alors le centre de gravité ne coïncidera plus avec le point *C*, il tombera en un point *G* quelconque ; si alors on mène *CG*, la direction de cette ligne indiquera la nuance dominante du mélange, sa longueur la vivacité de la teinte, et le rayon diminué de *GC* représentera la quantité de lumière blanche mêlée à la teinte dominante. Le cercle divisé dont nous venons de parler est très-propre pour démontrer que la sensation de la lumière blanche est le résultat des sensations simultanées de toutes les nuances du spectre : en effet, si on couvre chaque secteur de la nuance qui lui correspond, en le faisant mouvoir rapidement autour de son centre, on l'apercevra sensiblement blanc.

1265. *Hypothèse de M. Brewster sur la composition de la lumière.* M. Brewster, en analysant le spectre solaire par des verres ou des liquides colorés qui laissent passer seulement certaines teintes, a été conduit à une explication entièrement différente de celle de Newton. M. Brewster pense qu'il n'existe que trois espèces de rayons colorés, les rayons rouges, les rayons jaunes et les rayons bleus ; et il admet que dans les rayons d'une même teinte il en existe de différente réfrangibilité, mais que les rayons de différente réfrangibilité ont des intensités différentes, et que le spectre solaire est formé par la superposition de trois spectres, rouge, jaune et bleu, de même étendue, mais dans lesquels le maximum d'intensité n'est pas placé de la même manière. Dans le spectre rouge il est près d'une extrémité, dans le spectre jaune, près du milieu, et dans le spectre bleu, vers l'autre extrémité : alors la teinte d'un point quelconque du spectre résulte de la proportion des teintes des trois spectres, et cette teinte renferme toujours une certaine quantité de lumière blanche formée des trois rayons, rouge, jaune et bleu, dans les proportions constantes qui constituent la lumière blanche. Il est facile de reconnaître que cette hypothèse explique tous les phénomènes aussi bien que celle de Newton.

Nous rapporterons quelques-unes des expériences sur lesquelles M. Brewster a fondé l'opinion dont il s'agit. Si on place l'œil dans la direction d'un faisceau de rayons solaires après qu'il a traversé un prisme de verre blanc, en mettant devant l'œil une lame de verre bleu, l'apparence du spectre est complétement changée ; des bandes noires couvrent le milieu du rouge, tout l'orangé, une partie du vert, une partie considérable du bleu, un peu de l'indigo et très-peu du violet. Le jaune, qui n'a pas été absorbé, a augmenté de largeur ; il occupe d'un côté une partie de l'espace où se trouvait l'orangé, et de l'autre une partie de l'espace où se trouvait le vert : ainsi on voit du jaune dans les parties du spectre où se trouvaient l'orangé et le vert, et par conséquent ces teintes ne sont pas simples. A la vérité, elles ne peuvent pas être décomposées par la réfraction, étant formées de rayons également réfrangibles ; mais elles le sont par l'absorption. Enfin M. Brewster est parvenu à développer de la lumière blanche dans différents points du spectre par des verres colorés, et cette lumière blanche est alors indécomposable par réfraction. Ce dernier fait ne semble pouvoir être expliqué qu'en admettant que les verres colorés absorbent la teinte en excès sur les proportions de bleu, de rouge et de jaune, qui constituent la lumière blanche.

Digitized by Google

1266. *Des raies du spectre.* Quand on a pris tout le soin nécessaire pour obtenir un spectre solaire bien pur et d'une étendue suffisante, on y observe plusieurs particularités remarquables qui ont été signalées pour la première fois par Wollaston, mais qui ont été étudiées avec beaucoup de soin par Frauenhoffer, habile artiste de Munich.

Le spectre, observé avec une lunette, est rayé de lignes noires, ou seulement obscures, parallèles, très-irrégulièrement réparties dans son étendue. Ces raies sont tout à fait indépendantes de l'angle réfringent du prisme et de la substance réfringente; dans tous les cas, leur forme et leurs positions relatives ne changent pas.

La fig. 784 représente la disposition des raies telles qu'elles ont été observées par Frauenhoffer. Pour établir quelques points de repère au milieu de cette multitude de raies, Frauenhoffer a choisi les raies marquées par les lettres, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H*, comme étant les plus faciles à reconnaître, et divisant le spectre en parties qui ne sont pas trop inégales. *B* se trouve à l'extrémité rouge, *C* plus haut dans la même couleur, *D* dans l'orangé (c'est une grosse ligne double que l'on reconnaît aisément), *E* se trouve dans le vert, *F* dans le bleu, *G* dans l'indigo, et *H* dans le violet. Le nombre total des raies du spectre est de plus de 700.

Quand on veut observer ces phénomènes, il faut prendre toutes les précautions possibles pour obtenir un spectre bien pur ; mais cela ne suffit pas. Les espaces noirs étant beaucoup trop fins et beaucoup trop resserrés pour être aperçus directement, il faut les observer avec une lunette ayant un grossissement suffisant. Voici de quelle manière on peut disposer l'appareil. On pratique au volet d'une chambre obscure une fente très-étroite qui laisse passer les rayons solaires, ou, ce qui vaut mieux, on place dans la fente une lentille cylindrique très-convergente, qui forme derrière elle un foyer rectiligne : alors on reçoit le faisceau de lumière sur un prisme d'une substance très-pure, dont les arêtes sont parallèles à celles de la fente, et derrière le prisme on place une lunette achromatique. C'est en regardant dans cette lunette toutes les nuances du spectre que l'on distingue facilement les différentes raies. Pour concevoir l'effet produit par la lunette achromatique, il faut remarquer que, si l'on regardait directement le prisme, en plaçant l'œil dans le faisceau réfracté, on verrait un spectre dont le lieu serait le point de concours des rayons divergents qui arriveraient à l'œil : alors, si on se sert d'une lentille achromatique, c'est-à-dire qui ne décompose pas la lumière, on verra une image amplifiée du spectre, dans laquelle les couleurs et les raies auront les mêmes positions relatives. Pour que les raies soient aperçues distinctement, il faut que la lunette soit allongée de manière qu'étant dirigée sur la fente du volet, on l'aperçoive distinctement ; il faut même changer un peu la position de l'oculaire pour voir bien distinctement les différentes raies : il faut l'enfoncer un peu plus pour les raies qui se trouvent dans le violet que pour celles qui se trouvent dans le rouge. Lorsque le prisme est tourné de manière que l'angle d'incidence excède celui du minimum de déviation, les raies disparaissent ; mais elles reparaissent en raccourcissant la lunette. Elles disparaissent également quand l'angle d'incidence est plus petit que celui du minimum de déviation ; mais elles deviennent distinctes quand on allonge la lunette. En élargissant l'orifice, les raies les plus fines disparaissent, et ensuite les plus larges.

Pour mesurer la distance des raies Frauenhoffer s'est servi d'un appareil désigné sous le nom de *micromètre*. Cet appareil se compose de deux fils métalliques parallèles, tendus dans un cadre placé dans la lunette ; un d'eux est fixe, et l'autre peut s'éloigner ou se rapprocher du premier à l'aide d'une vis, disposée comme dans la fig. 5 : alors on peut facilement mesurer l'écartement des fils dans une position quelconque. Pour appliquer cet instrument à la mesure de l'écartement de deux raies, on

Digitized by Google

fait coïncider les fils avec les raies, et la position de la vis micrométrique donne leur distance.

Frauenhoffer a constaté par de nombreuses expériences 1° que, pour la même espèce de lumière, le nombre des raies, leur forme et leurs dispositions, sont entièrement indépendantes de l'angle réfringent du prisme ainsi que de la substance réfringente ; 2° que les raies sont les mêmes, non-seulement pour la lumière émanée directement du soleil, mais pour celle qui provient indirectement du soleil, telles que celles des planètes, de la lune, du ciel, des nuages ; 3° que les spectres provenant de la lumière des étoiles, des flammes, de l'électricité, donnent des raies disposées d'une manières différente ; 4° que la lumière électrique, celle des lampes ordinaires et de la flamme de l'alcool, donnent des raies brillantes, tandis que tous les autres foyers de lumière donnent des raies obscures.

Dans le spectre provenant de la lumière d'une lampe, il y a deux lignes brillantes dans le rouge ; dans le spectre formé par la lumière électrique, les raies les plus brillantes sont dans le vert et l'orangé : il en existe aussi une plus faible dans le rouge. Frauenhoffer, pour obtenir une ligne lumineuse par l'électricité, réunissait deux conducteurs par un fil de verre d'un demi-pouce de longueur et très-fin ; un des conducteurs communiquait avec une machine électrique, l'autre avec la terre.

La découverte des raies est d'une très-grande importance, parce que les points fixes que les raies établissent dans le spectre permettent de déterminer avec une grande précision les indices de réfraction des principaux rayons colorés ; ce que l'on n'avait pu faire jusqu'ici que d'une manière vague.

Le tableau suivant renferme les indices des rayons correspondants aux principales raies pour plusieurs substances et la lumière solaire.

Tableau des indices de réfraction des rayons du spectre correspondants aux principales raies.

SUBSTANCES RÉFRINGENTES.	B	C	D	E	F	G	H
Flint-glass n° 13 . . .	1,627749	1,629681	1,635036	1,642024	1,648260	1,660285	1,671062
Crown-glass	1,525852	1,526846	1,529587	1,533005	1,536052	1,660285	1,671062
Eau	1,330955	1,331712	1,333577	1,335851	1,337818	1,341657	1,346506
Eau	1,330977	1,331709	1,333577	1,335849	1,337788	1,341293	1,344177
Dissolution de potasse.	1,399629	1,400515	1,402805	1,405652	1,408082	1,341261	1,344162
Huile de térébenthine.	1,470496	1,471550	1,474454	1,478553	1,481756	1,412579	1,416568
Flint-glass n° 3. . . .	1,602042	1,605800	1,608494	1,614552	1,620042	1,488198	1,493874
Flint-glass n° 30 . . .	1,623570	1,625477	1,630585	1,637556	1,643466	1,630772	1,640373
Crown-glass n° 13 . .	1,524312	1,525299	1,527982	1,531572	1,534337	1,653406	1,666072
Crown-glass lett. M .	1,554774	1,555953	1,559075	1,563150	1,566741	1,559008	1,544684
Flint-glass n° 23 . prisme de 60° . . .	1,626596	1,628469	1,633667	1,640495	1,646756	1,575535	1,570470
Flint-glass n° 23 . prisme de 45° . . .	1,626564	1,628451	1,633666	1,640544	1,646780	1,658848 1,658849	1,669686 1,669680

Depuis la découverte de Frauenhoffer, on a reconnu que la lumière d'une lampe, en passant à travers l'acide nitreux, donne un spectre dans lequel on aperçoit des

Digitized by Google

raies noires irrégulièrement disposées, comme dans la lumière solaire, mais qui ne sont pas les mêmes; la vapeur d'iode et de brôme produisent des raies également espacées; le chlore et l'indigo en vapeur ne produisent rien. Ces expériences peuvent être facilement répétées en employant une lampe à courant d'air, devant laquelle on place un écran percé d'une fente d'un demi-millimètre de largeur, un flacon de trois ou quatre pouces de diamètre renfermant les vapeurs, à 12 pieds un bon prisme de flint-glass jaune, et observant le spectre avec une lunette d'opéra achromatique grossissant de 4 à 5 fois.

Les flammes colorées produisent des spectres à larges raies noires, correspondantes aux teintes qui manquent dans la flamme. On obtient une flamme d'un jaune presque pur en projetant du soufre dans un creuset incandescent, ou en brûlant de l'alcool mêlé avec un quart d'eau saturée de sel marin; en remplaçant le sel marin par des sels solubles de barite, de strontiane ou de cuivre, on obtient des flammes vert-pomme, rouge-cramoisi, et bleu-verdâtre. La lumière de la flamme d'alcool mêlée d'eau salée porte souvent le nom de *lumière monochromatique*. Lorsqu'on observe cette flamme à travers un prisme, les contours de l'image sont très-nets; on aperçoit seulement de chaque côté de très-faibles nuances de rouge et de violet.

1267. *Propriétés éclairantes des différentes parties du spectre.* D'après M. Herschel, le maximum de lumière existe dans les rayons jaunes et verts, et diminue insensiblement jusqu'au rouge et au violet, et c'est dans cette dernière teinte que se trouve le minimum. Newton avait déjà annoncé des résultats peu différents. On peut vérifier ce fait en faisant tomber le spectre sur un livre imprimé, et déterminant approximativement les distances auxquelles on peut apercevoir distinctement les caractères éclairés par les différents rayons.

1268. *Propriétés calorifiques des rayons du spectre.* On avait supposé d'abord que la partie la plus lumineuse du spectre devait posséder en même temps la plus grande chaleur, et par conséquent que le maximum de chaleur existait dans le jaune; mais des expériences de M. Bérard fixèrent ce maximum dans le rouge; d'autres, d'Herschel, le plaçaient dans la bande obscure qui suit le rouge. En 1828, M. Seebeck reconnut que la position du maximum de chaleur dépendait de la nature du prisme réfringent : car, en employant des prismes d'eau, d'acide sulfurique, de verre ordinaire et de flint-glass, le maximum existait dans le jaune, l'orange, le rouge, ou au delà du rouge, dans la partie obscure du spectre. D'après les nouvelles expériences de M. Melloni, le maximum est d'autant plus écarté du jaune vers le rouge que la matière du prisme est plus diathermane; pour le sel gemme, le maximum est au delà du rouge, à une distance égale à la distance du rouge au jaune. En décomposant le faisceau de lumière solaire par un prisme de sel gemme, et le faisant passer ensuite à travers une lame d'eau renfermée entre deux plaques de verre parallèles, le maximum se rapproche du rouge, et pénètre dans le spectre à mesure qu'on augmente l'épaisseur de la couche d'eau. Pour une épaisseur de 4 millimètres, le maximum est dans le rouge; pour une épaisseur de 300 millimètres, il est dans le jaune. Des lames de verre d'épaisseurs croissantes produisent les mêmes effets, mais avec moins d'énergie. Lorsqu'on substitue aux lames d'eau ou de verre des plaques de verre coloré, certains rayons colorés sont absorbés, et le spectre lumineux est interrompu par des bandes plus ou moins obscures, tandis que le spectre calorifique n'éprouve aucun changement correspondant dans sa forme et sa position, mais seulement des variations d'intensité qui affectent tous ses points. Enfin, si on fait passer le faisceau à travers l'eau et un verre vert, coloré par de l'oxyde de cuivre, on parvient à faire disparaître complètement le spectre calorifique; et le faisceau lumineux, concentré par une lentille en un point où la lumière d'un jaune verdâtre a un éclat aussi

Digitized by Google

grand que la lumière directe du soleil, n'y produit pas de chaleur sensible aux thermoscopes les plus délicats. Il résulte nécessairement de tous les faits que nous venons de rapporter que la chaleur et la lumière du soleil sont deux choses distinctes.

On peut se rendre compte du déplacement du maximum de chaleur dans le spectre calorifique formé avec un prisme de sel gemme par l'interposition d'une lame diathermane, en admettant que le coefficient d'absorption diminue avec la réfrangibilité. Quant à la différence de position de ce maximum quand on emploie des prismes de différentes matières, elle provient probablement et de la variation des coefficients d'absorption des différents rayons, et des chemins que les rayons ont parcourus dans le prisme.

1269. *Propriétés chimiques des rayons colorés.* La lumière solaire a une grande influence sur plusieurs phénomènes chimiques : sa présence est nécessaire à la formation des parties vertes des plantes ; elle détermine la combinaison du chlore et de l'hydrogène ; elle fait passer au violet le chlorure d'argent, etc. Il était important de vérifier si cette propriété appartenait également à tous les rayons. Schèele reconnut le premier que le rayon violet agissait plus fortement sur le chlorure d'argent que les autres rayons ; Sennebier découvrit ensuite que le rayon violet avait aussi plus d'influence pour le développement de la partie verte des végétaux. MM. Wollaston, Ritter, Beckmann et Bérard ont reconnu, depuis, que l'action chimique s'étendait au delà du spectre, du côté des rayons violets. Pour donner une idée de la différence d'action chimique des rayons rouges et violets, nous rapporterons une des expériences de M. Bérard. Ayant concentré au moyen de deux lentilles les rayons rouges et les rayons violets, du chlorure d'argent, placé au foyer des rayons violets, était coloré en moins de cinq minutes, tandis que celui qui était placé au foyer des rayons rouges n'avait éprouvé aucune altération après deux heures. D'après les expériences récentes de Mme de Sommerville, les lames de verre d'un vert très-pâle, d'un vingtième de pouce, absorbent complétement les rayons du soleil qui produisent les actions chimiques : car du chlorure d'argent étendu sur du papier recouvert d'une lame de verre vert, et exposé pendant une demi-heure à l'action du soleil, n'a éprouvé aucune altération ; au contraire, les plaques de sel gemme, d'émeraude verte, les verres blancs, bleu-foncé, violets, de plus d'un tiers de pouce d'épaisseur, sont très-perméables à ces rayons. Il serait important de suivre ces expériences, et de vérifier si, comme cela paraît probable, les effets chimiques sont dus aux rayons de chaleur les plus réfringents.

1270. *De la dispersion.* On désigne sous le nom de *dispersion* la différence des indices de réfraction d'une même substance du spectre : ainsi, en représentant par n_V l'indice des rayons violets, par n_r l'indice des rayons rouges, la dispersion sera représentée par $n_V - n_r$.

$n_V - n_r$, multiplié par le sinus d'incidence, représente sensiblement l'angle dans lequel les rayons de différentes couleurs sont étalés quand un rayon de lumière blanche passe d'un milieu dans l'air sous un angle d'incidence très-petit. En effet, considérons un rayon de lumière blanche AB (*fig.* 785) se présentant sous un angle d'incidence i très-petit, à la seconde surface MN d'un corps réfringent, et soient Bv et Br les directions des rayons émergents violets et rouges : les écarts de ces deux rayons étant très-petits, l'angle qu'ils forment entre eux sera sensiblement égal à $\sin r' - \sin r$; mais l'incidence commune étant i, on a $\sin r' = n_V \sin i$, et $\sin r = n_r \sin i$, et par conséquent $\sin r' - \sin r = (n_V - n_r) \sin i$.

D'après le tableau précédent (page 224), la dispersion de la lumière comprise entre la première raie et la septième serait exprimée par les nombres suivants :

Flint-glass, n° 13.	0,043313
Crown-glass, n° 9	0,020734

Digitized by Google

Eau	0,013242
Eau	0,013185
Dissolution de potasse	0,016739
Térébenthine	0,023378
Flint-glass, n° 3	0,038331
Flint glass, n° 30	0,042502
Crown-glass, n° 13	0,020372
Crown-glass, lett. M.	0,024696
Flint-glass, n° 23, prisme de 60°.	0,043090
Flint-glass, n° 23, prisme de 45°.	0,043116

On désigne sous le nom de *pouvoir dispersif* la dispersion divisée par l'indice moyen de réfraction, celui du rayon jaune diminué de l'unité ; ainsi, en admettant la notation précédente, le pouvoir dispersif sera représenté par

$$\frac{n_v - n_r}{n_j - 1}$$

Cette expression représente sensiblement le rapport entre l'angle occupé par les rayons colorés et la déviation du rayon jaune quand la lumière passe d'un milieu réfringent dans l'air sous un angle d'incidence très-petit : car, d'après ce qui précède, le premier angle est représenté par $\sin i\,(n_v - n_r)$, et le second par $\sin i\,(n_j - 1)$.

Le tableau suivant, extrait de l'Encyclopédie de Brewster, renferme les dispersions et les pouvoirs dispersifs d'un grand nombre de substances ; ces nombres ont été obtenus en prenant les indices des rayons extrêmes et celui du jaune-verdâtre. Ils ne présentent pas, à beaucoup près, la même exactitude que si les teintes avaient été rapportées aux raies du spectre, car la position des rayons colorés offre un peu d'incertitude ; mais ces observations sont antérieures à la découverte des raies.

Digitized by Google

TABLEAU

Des dispersions et des pouvoirs dispersifs de plusieurs substances.

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS DISPERSIFS OU $\frac{n_v - n_r}{n_j - 1}$	DISPERSIONS OU $n_v - n_r$
Chromate de plomb, maximum estimé à. . .	0,400	0,770
Chromate de plomb, *id.*, doit excéder . . .	0,296	0,570
Réalgar fondu	0,267	0,594
Chromate de plomb, minimum.	0,262	0,588
Réalgar fondu	0,255	0,574
Huile de cassia	0,139	0,089
Soufre, après la fusion	0,130	0,149
Phosphore	0,128	0,156
Sulfure de carbone.	0,115	0,077
Baume de Tolu	0,105	0,065
Baume du Pérou	0,095	0,058
Carbonate de plomb, maximum	+0,091	+0,091
Aloès des Barbades.	0,085	0,058
Huile d'amande amère.	0,079	0,048
Huile d'anis	0,077	0,044
Acétate de plomb fondu	0,069	0,040
Baume styrax	0,067	0,059
Gayac.	0,066	0,041
Carbonate de plomb, minimum.	0,066	0,056
Huile de cumin.	0,065	0,055
Huile essentielle de tabac.	0,064	0,055
Gomme ammoniaque	0,063	0,057
Huile de goudron des Barbades	0,062	0,052
Huile de girofle.	0,062	0,055
Verre vert	0,061	0,057
Sulfate de plomb	0,060	0,056
Verre rouge foncé	0,060	0,044
Huile de sassafras	0,060	0,052
Hydro-chlorate d'antimoine	0,059	0,056
Verre opale	0,060	0,058
Résine.	0,057	0,052
Huile de fenouil.	0,055	0,028
Huile de menthe sauvage.	0,054	0,026
Verre orangé	0,053	0,042
Sel gemme	0,053	0,029
Caoutchouc	0,052	0,028
Huile de piment.	0,052	0,026
Flint-glass	0,052	0,052
Verre pourpre foncé	0,051	0,051
Huile d'angélique	0,051	0,025
Huile de thym	0,050	0,024
Huile de fenu-grec.	0,050	0,024
Huile d'absynthe	0,049	0,022
Huile de pouliot.	0,049	0,024
Huile de carvi	0,049	0,024
Huile de dill.	0,049	0,023
Huile de bergamote	0,049	0,023

Digitized by Google

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS DISPERSIFS OU $\frac{n_V - n_R}{n_J - 1}$	DISPERSIONS OU $n_V - n_R$
Flint-glass	0,048	0,029
Térébenthine de Chio	0,048	0,028
Encens	0,048	0,028
Huile de limon	0,048	0,023
Flint-glass	0,048	0,028
Huile de genièvre	0,047	0,022
Huile de camomille	0,046	0,021
Gomme de genièvre	0,046	0,023
Carbonate de strontiane, maximum	0,046	0,032
Huile de brick (*oil of brick*)	0,046	0,0 1
Acide nitrique	0,045	0,019
Huile de lavande	0,045	0,021
Baume de soufre	0,045	0,023
Écaille de tortue	0,045	0,027
Corne	0,045	0,025
Baume de Canada	0,045	0,024
Huile de marjolaine	0,045	0,022
Gomme oliban	0,045	0,024
Acide nitreux	0,044	0,018
Huile de cajeput	0,044	0,021
Huile d'hysope	0,044	0,022
Huile de bois de Rhodes	0,044	0,022
Verre rose	0,044	0,025
Huile de sabine	0,014	0,021
Huile de pavot	0,044	0,020
Zircon, maximum	0,044	0,045
Acide muriatique	0,043	0,016
Copal	0,043	0,024
Huile de noix	0,043	0,022
Poix de Bourgogne	0,053	0,024
Huile de térébenthine	0,042	0,020
Huile de romarin	0,042	0,020
Feldspath	0,042	0,022
Glu	0,041	0,022
Baume de copahu	0,041	0,021
Ambre	0,041	0,023
Huile de muscade	0,041	0,021
Stilbite	0,041	0,021
Huile de menthe poivrée	0,040	0,019
Rubis spinelle	0,040	0,051
Spath calcaire, maximum	0,040	0,027
Huile de colza	0,040	0,019
Verre de bouteille	0,040	0,023
Tartrate de potasse et de soude	0,039	0,020
Gomme élémi	0,039	0,021
Sulfate de fer	0,039	0,019
Diamant	0,038	0,056
Huile d'olive	0,038	0,018
Gomme mastic	0,038	0,022
Blanc d'œuf	0,037	0,013
Huile de Rhue	0,037	0,016
Gomme myrrhe	0,037	0,020

Digitized by Google

NOMS DES SUBSTANCES.	POUVOIRS DISPERSIFS OU $\frac{n_V - n_R}{n_J - 1}$	DISPERSIONS OU $n_V - n_R$
Béril	0,037	0,022
Obsidienne	0,037	0,018
Éther	0,037	0,012
Sélénite	0,037	0,020
Alun	0,036	0,017
Huile	0,036	0,018
Sulfate de cuivre	0,036	0,019
Crown très-vert	0,036	0,020
Gomme arabique	0,036	0,018
Sucre, après la fusion et refroidi	0,036	0,020
Colle de poisson	0,035	0,013
Eau	0,035	0,012
Humeur aqueuse de l'œil d'un poisson	0,035	0,012
Humeur vitrée du même	0,035	0,012
Acide nitrique	0,035	0,019
Rubellite	0,035	0,027
Leucite	0,035	0,018
Épidote	0,035	0,024
Verre de borax	0,034	0,018
Grenat	0,033	0,027
Pyrope	0,033	0,026
Chrysolite	0,033	0,022
Crown	0,033	0,018
Huile d'ambre gris	0,032	0,012
Huile de vin	0,032	0,012
Acide phosphorique solide	0,032	0,017
Verre de phosphore	0,03157	0,017
Verre à vitres	0,032	0,017
Acide sulfurique	0,031	0,014
Acide tartrique	0,030	0,016
Nitre, minimum	0,03040	0,009
Borax	0,030	0,014
Axinite	0,030	0,022
Alcool	0,029	0,011
Sulfate de baryte	0,029	0,011
Tourmaline	0,028	0,019
Acide phosphorique liquide	0,0283	0,012
Carbonate de baryte, minimum	0,0285	0,013
Carbonate de strontiane, minimum	0,027	0,015
Cristal de roche	0,026	0,014
Émeraude	0,026	0,015
Verre de borax	0,026	0,014
Spath calcaire, minimum	0,026	0,016
Saphir bleu	0,026	0,025
Topase bleue de Caimgorm	0,025	0,016
Crhysobéril	0,025	0,019
Topase bleue d'Aberdeenshire	0,024	0,016
Sulfate de strontiane	0,024	0,015
Acide prussique	0,022	0,080
Acide malique	0,0280	0,011
Spath fluor	0,022	0,010
Cryolite	0,022	0,007

Digitized by Google

1271. *Achromatisme.* Un prisme est dit *achromatique* quand il jouit de la propriété de dévier la lumière sans la disperser; une lentille est également achromatique lorsqu'elle ne disperse point la lumière, en conservant la propriété de la dévier. Ainsi, des prismes et des lentilles sont achromatiques quand les images que l'on voit à travers leur épaisseur conservent les teintes des images vues directement, et ne sont point terminées par des franges irisées. Les prismes et les lentilles achromatiques se forment par la réunion de prismes et de lentilles de différents verres inégalement réfringents.

Newton, par suite d'expériences inexactes, avait cru que le rapport des déviations des différents rayons restait constant, quelle que fût la nature du milieu réfringent; il en résultait alors que la différence des déviations des rayons extrêmes, ou l'angle dans lequel les rayons de différentes teintes sont étalés, était proportionnelle à la déviation d'un rayon quelconque, et par suite que l'achromatisme était incompatible avec une déviation quelconque. Cette erreur subsista longtemps. Euler soupçonna le premier la possibilité de l'achromatisme par cette seule considération qu'il existe dans le cristallin. En 1733, Hall, gentilhomme du comté de Worcester, s'aperçut le premier de l'erreur de Newton en constatant que le pouvoir dispersif varie dans les différentes espèces de verre; mais ce ne fut qu'un 1757 que Jean Dollond, habile opticien de Londres, rendit cette découverte publique.

1272. Les prismes achromatiques sont ordinairement composés de deux prismes, l'un de verre ordinaire (crown-glass), l'autre de verre renfermant une grande quantité de plomb (flint-glass), dont les angles réfringents sont opposés. Pour concevoir comment l'achromatisme peut exister, considérons un prisme traversé par un faisceau de lumière blanche. Si on place derrière ce prisme un autre prisme de même angle et de même substance dans une position contraire, de manière que les faces voisines soient parallèles, la dispersion et la déviation produites par le premier prisme seront détruites par le second, puisque leur système formera une plaque à faces parallèles. Supposons maintenant que le second prisme soit formé d'une substance plus dispersive que celle du premier; comme la dispersion augmente avec l'angle du prisme, le second prisme, pour rendre l'image incolore, devra avoir un angle réfringent plus petit que le premier; et l'image sera blanche, tout en conservant une certaine déviation.

Les réfrangibilités des différents rayons colorés ne conservant pas entre eux les mêmes rapports, il faudrait à la rigueur employer autant de prismes que l'on voudrait achromatiser de rayons colorés; mais comme les variations de réfrangibilité sont peu considérables, lorsqu'on a rendu parallèles après leur émergence les rayons qui se trouvent à la limite du spectre, tous les autres sont sensiblement parallèles. Alors, en déterminant le rapport des angles réfringents des deux prismes de manière à satisfaire à cette condition, leur système est suffisamment achromatique; mais quand on veut avoir une plus grande exactitude, on emploie trois prismes, dont on détermine les angles par la condition de l'achromatisme des rayons rouges, violets et jaunes.

Cette détermination s'effectue très-facilement quand les angles des prismes sont très-petits, et que les rayons les traversent presque perpendiculairement.

Considérons d'abord (*fig.* 786) un rayon *Im* rencontrant un prisme sous un angle quelconque : en désignant par i et e les angles d'incidence et d'émergence, par r et r' les angles de réfraction, par a l'angle du prisme, et par δ la déviation, le triangle *kmn* donnera $\delta = i - r + e - r'$; et, comme $r + r' = a$, il vient $\delta = i + e - a$. Si on suppose que l'angle a soit très-petit, et que n_V représente l'indice pour le rayon violet, on aura $i = n_V r$, $e = n_V r'$; et il viendra

$$\delta = a(n_V - 1).$$

Digitized by Google

Pour un autre prisme dont l'indice pour le même rayon serait n'_v, on aurait

$$\delta' = a'(n'_v - 1);$$

et, si les prismes étaient accolés et placés en sens contraire, en désignant par D la déviation totale, on aurait

$$D = a(n_v - 1) - a'(n'_v - 1).$$

Représentons maintenant par n_r et n'_r les indices des deux prismes pour le rayon rouge, et par D' leur déviation, on aura de même

$$D' = a(n_r - 1) - a'(n'_r - 1);$$

or, pour que l'achromatisme existe pour ces deux rayons, il faut que $D = D'$: on a alors

$$a(n - 1) - a'(n'_v - 1) = a(n_r - 1) - a'(n'_r - 1), \text{ d'où } a' = a\frac{a_v - n_r}{n'_v - n'_r},$$

équation à l'aide de laquelle on trouvera l'angle du second prisme, celui du premier étant connu. Il faut remarquer que, d'après la dernière équation, les angles des prismes sont en raison inverse de leur dispersion; et on voit, d'après cela, que, si la dispersion était proportionnelle à la déviation, comme Newton l'avait supposé, on aurait

$$\frac{n_v - n_r}{n_v - n'} = \frac{n_r - 1}{n'_r - 1}, \quad \text{et par suite} \quad a(n_r - 1) = a'(n'_r - 1).$$

La déviation D serait nulle, et par conséquent l'achromatisme impossible

Si on voulait achromatiser trois ou un plus grand nombre de rayons, il faudrait employer le même nombre de prismes, et on trouverait facilement les équations nécessaires à la détermination des angles de ces prismes en fonction de l'un d'eux.

1273. On peut déterminer par l'expérience le rapport que doivent avoir les angles de deux prismes de substances différentes pour que leur ensemble soit achromatique, en prenant un prisme de la première substance, et en appliquant contre une de ses faces un prisme de la seconde substance dont l'angle soit variable, regardant à travers l'ensemble, et faisant varier l'angle du second prisme jusqu'à ce que les franges irisées qui bordent les images aient disparu, c'est-à-dire jusqu'à ce qu'on ait satisfait à la condition de l'achromatisme. On peut facilement rendre l'angle du second prisme variable quand il doit être formé d'une substance liquide, en renfermant ce liquide entre deux glaces dont on peut changer l'inclinaison; mais quand la substance du deuxième prisme doit être solide, et c'est ce qui a lieu ordinairement, on peut employer un prisme composé de deux parties A et B (*fig.* 787), terminées par un plan et une portion de cylindre à base circulaire : en faisant tourner les surfaces cylindriques l'une sur l'autre, on fait varier l'angle des faces planes. Cette méthode est peu employée, à cause de la difficulté de travailler les surfaces cylindriques, concaves et convexes qui terminent les parties du prisme à angle variable; la suivante est bien préférable. On prend un prisme triangulaire droit de flint-glass, sans stries (*fig.* 788), dont la hauteur soit assez considérable pour qu'on puisse le diviser en deux autres par un plan perpendiculaire aux arêtes; on obtient ainsi deux prismes parfaitement égaux. Il est évident que, si on les place de manière que leurs arêtes soient parallèles, et que les angles refringents égaux soient opposés, le prisme formé par leur réunion aura un angle nul, et que, si on fait tourner un des prismes autour

Digitized by Google

d'un axe perpendiculaire à la face commune en rendant l'autre fixe; on obtiendra un prisme dont l'angle variera d'une manière continue, de zéro au double de l'angle A. Pour produire ce mouvement d'une manière commode, on fixe les deux prismes avec du mastic dans des douilles de cuivre qui s'emboîtent; en plaçant une division sur l'une d'elles et un index sur l'autre, on peut reconnaître dans chaque position l'angle formé par les sections principales des deux prismes, et par les formules de la trigonométrie sphérique on peut en déduire l'angle du prisme composé quand on connaît l'angle réfringent commun des prismes simples. Cet instrument, désigné sous le nom de *diasporamètre,* est dû à Rochon.

Pour trouver l'angle x du prisme composé en fonction de l'angle i de chacun des deux prismes, et de l'angle φ, dont on a tourné l'un d'eux, soient OP (*fig.* 789) une perpendiculaire à la face de contact des deux prismes, OP' une perpendiculaire à l'autre face du prisme fixe, et OP'' une perpendiculaire à la face extérieure de l'autre prisme : dans le triangle sphérique mnp on a, $\cos x = \cos^2 i + \sin^2 i \cos \varphi$, d'où l'on tire, $1 - \cos x = \sin^2 i\,(1 - \cos \varphi)$, et par suite, $\sin \frac{x}{2} = \sin i \sin \frac{\varphi}{2}$.

1274. Lorsqu'on emploie un prisme achromatique dans lequel on a rendu parallèles les rayons extrêmes, les autres rayons, comme nous l'avons déjà dit, ne coïncident pas, et le prisme produit un nouveau spectre très-étroit par rapport à celui de chaque prisme en particulier, et dont les teintes extrêmes sont le vert et le jaune orangé. Ces spectres ont été désignés sous le nom de *spectres secondaires.*

1275. D'après le docteur Brewster, si l'on forme avec deux des substances renfermées dans la liste suivante des prismes composés réunissant les rayons rouges et violets extrêmes, le rayon vert sera dévié de la direction du faisceau émergent, et se rapprochera de celle du rayon réfracté par la substance qui précède l'autre dans cette liste.

1. Acide sulfurique.
2. Acide phosphorique.
3. Acide sulfureux.
4. Acide phosphoreux.
5. Hydrogène sursulfuré.
6. Eau.
7. Glace.
8. Blanc d'œuf.
9. Cristal de roche.
10. Acide nitrique.
11. Acide prussique.
12. Acide muriatique.
13. Acide nitreux.
14. Acide acétique.
15. Acide malique.
16. Acide citrique.
17. Spath fluor.
18. Topaze (bleue).
19. Béril.
20. Sélénite.
21. Leucite.
22. Tourmaline.
23. Borax.
24. Borax (verre de).
25. Éther.
26. Alcool.
27. Gomme arabique.
28. Crown-glass.
29. Huile d'amande douce.
30. Soude et tartrate de potasse.
31. Gomme de genièvre.
32. Sel gemme.
33. Spath calcaire.
34. Huile d'ambre gris.
35. Huile de genièvre.
36. Huile de spermacéti.
37. Huile de navette.
38. Huile d'olive.
39. Zircon.
40. Flint-glass.
41. Huile de Rhodes.
42. Huile de romarin.
43. Huile de sainfoin.
44. Baume de copahu.
45. Huile de noix.
46. Huile de sabine.

Digitized by Google

47. Huile de rhue.
48. Huile de faine.
49. Nitrate de potasse.
50. Diamant.
51. Résine.
52. Gomme copal.
53. Huile de castor.
54. Huile de camomille.
55. Huile d'anet.
56. Huile d'absynthe.
57. Huile de marjolaine.
58. Huile de bergamotte.
59. Huile de menthe.
60. Huile de thym.
61. Huile de muscade.
62. Huile de carvi.
63. Huile de citron.
64. Ambre.
65. Huile de menthe crépue.
66. Huile d'hysope.
67. Huile de pavot.
68. Huile de pouliot.
69. Huile de sauge.
70. Huile de térébenthine.
71. Baume de Canada.
72. Huile de lavande.
73. Muriate d'antimoine.
74. Huile de clous de girofle.
75. Huile de fenouil.
76. Verre de couleur rouge.
77. Verre orangé.
78. Verre opale.
79. Acétate de plomb (dissous).
80. Huile d'ambre.
81. Huile de sassafras.
82. Huile de cumin.
83. Huile d'anis.
84. Huile essentielle d'amande amère.
85. Carbonate de plomb.
86. Baume de Tolu.
87. Sulfure de carbone.
88. Soufre.
89. Huile de casse.

1276. Si on employait trois prismes partiels, le prisme composé produirait des spectres beaucoup plus petits, qu'on désigne sous le nom de *spectres tertiaires*, etc.

1277. On peut facilement conclure de ce que nous avons dit (1256) qu'il serait toujours possible d'achromatiser un prisme, quelque grand que soit son angle réfringent, à l'aide d'un autre prisme de même matière ou de matière différente, dont l'angle pourrait être aussi petit qu'on voudrait, en présentant ce second prisme au premier sous un angle convenable. En effet, en faisant varier l'inclinaison du second prisme, on pourra toujours obtenir une dispersion égale à celle du premier, car la dispersion augmente avec la déviation, et comme dans un même prisme, ou dans des prismes de la même substance, la dispersion ne croît pas proportionnellement à la déviation, l'achromatisme laissera toujours subsister une certaine déviation.

1278. Quand on emploie deux prismes, on ne détermine pas les angles réfringents de manière à compenser les déviations des rayons qui forment les limites extrêmes du spectre parce qu'ils sont trop peu lumineux pour que leur compensation soit importante; on compense les rayons qui ont le plus d'éclat, tels que les rayons *D* et *F* (*fig.* 784), qui appartiennent à l'orangé et au vert. Si on employait trois prismes, ce serait les rayons *C*, *F* et *G* qu'il faudrait achromatiser.

1279. *Des lentilles achromatiques.* Nous avons déjà dit que, quand un faisceau de lumière blanche était réfracté à travers une lentille, les rayons de différentes couleurs formaient leurs foyers à part, dans l'ordre violet, indigo.., rouge, à partir de la lentille; les lentilles achromatiques sont celles qui réunissent tous ces foyers en un même point. On construit les lentilles achromatiques comme les prismes achromatiques, en réunissant plusieurs lentilles de verre douées de pouvoirs dispersifs différents; on les forme ordinairement de flint-glass et de crown-glass. Il en est des lentilles comme des prismes : on ne pourrait réellement parvenir à un achromatisme complet qu'en employant une infinité de lentilles différentes; mais ordinairement on en emploie deux dont on détermine les courbures de manière à achromatiser les rayons rouges et les rayons jaunes. Quand on en emploie trois, ce sont les rayons *C*, *F* et *G* (*fig.* 784) que l'on réunit : alors l'achromatisme est aussi parfait qu'on peut

Digitized by Google

le désirer. Lorsqu'on emploie seulement deux lentilles, on peut facilement déterminer leur courbure au moyen de la formule renfermée dans l'article suivant.

Soient Pa (*fig.* 790) un rayon incident, ab le rayon réfracté dans la première lentille, bP' la direction du rayon émergent dans l'air, bc le rayon réfracté dans la seconde lentille et cP'' le rayon émergent. P' est le foyer conjugué de P par rapport à la première lentille, P' et P'' sont également des foyers conjugués relativement à la seconde lentille : car, si un rayon incident partait du point P'', il traverserait la lentille dans la direction cb, et émergerait dans une direction telle, que si un rayon arrivait dans cette direction il traverserait la lentille suivant bc, et cette direction est évidemment celle de bP'. Ainsi, en désignant par n_v et n'_v les indices d'un même rayon pour la substance de la première et de la seconde lentille, on aura

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{a} \quad \text{et} \quad a=\frac{RR'}{(n_v-1)(R+R')},$$

$$\frac{1}{p''}-\frac{1}{p'}=-\frac{1}{a'} \quad \text{et} \quad a'=\frac{R'R''}{(n'_v-1)(R'+R'')};$$

et, en ajoutant les deux premières équations, il viendra

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p''}=\frac{1}{a}-\frac{1}{a'}.$$

Pour un autre rayon incident dont les indices seraient n_r et n'_r, on aurait

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p''_1}=\frac{1}{a_1}-\frac{1}{a'_1} \quad \text{et} \quad \begin{cases} a_1=\dfrac{RR'}{(n_r-1)(R+R')}, \\ a'_1=\dfrac{R'R''}{(n'_r-1)(R'+R'')}. \end{cases}$$

Si on pose $p''=p''_1$, il vient $\frac{1}{a}-\frac{1}{a'}=\frac{1}{a_1}-\frac{1}{a'_1}$; et, en substituant pour a, a', a_1, a'_1, leurs valeurs, on trouve

$$R''=\frac{RR'=(n'_v-n'_r)}{(R+R')(n_v-n_r)-R(n'_v-n'_1)};$$

et, quand $R=R'$, il vient

$$R''=\frac{R(n'_v-n'_r)}{2(n_v-n_r)-(n'_v-n'_r)}.$$

Dans tous les cas, la valeur de R'' étant indépendante de p, l'achromatisme existe, quelle que soit la position du point lumineux.

1280. *Absorption de la lumière par les milieux transparents.* Il n'existe aucun milieu dont la transparence soit parfaite; tous absorbent une fraction plus ou moins grande de la lumière qui les traverse. L'air, qui est le plus transparent de tous les corps, éteint complétement la lumière d'un grand nombre d'étoiles, qui ne deviennent visibles que quand on s'élève sur de hautes montagnes; on sait aussi que la transparence de l'eau et du verre diminue à mesure que leur épaisseur augmente. Il est également très-probable qu'il n'existe point non plus de corps complétement opaques, et que, si on pouvait former avec tous les corps des lames suffisamment minces, elles seraient transparentes : car l'or en lames très-minces est perméable à la lumière; cette lumière ne provient pas de celle qui passe à travers les interstices que l'on pour-

Digitized by Google

rait supposer dans les lames d'or très-minces, car cette lumière est colorée en vert. L'absorption de la lumière par les milieux transparents n'affecte pas de la même manière tous les rayons dont se compose la lumière blanche, car la lumière qui a traversé un milieu transparent est toujours colorée. Celle qui a traversé une grande épaisseur d'air est bleue; celle qui a traversé une lame de verre ordinaire, d'une épaisseur suffisante, a une teinte verte plus ou moins foncée; enfin il existe un grand nombre de corps qui ne laissent passer que certains rayons colorés.

La diminution d'intensité que la lumière homogène éprouve en traversant les corps diaphanes provient des réflexions à la première et à la seconde surface, et de l'absorption. D'après Bouguer, la lumière qui traverse perpendiculairement une plaque de verre de l'épaisseur des glaces ordinaires éprouve par ces trois causes réunies une diminution de 0,1, et la perte due à la réflexion sur la première surface est d'environ 0,03.

1281. Pour expliquer les différents phénomènes d'absorption dont nous venons de parler, on a admis qu'un même milieu avait un pouvoir absorbant variable avec la couleur des rayons, et que, si on divisait le corps en lames très-minces d'égale épaisseur, un rayon quelconque, en traversant une quelconque de ces tranches, était toujours réduit à la même fraction de son intensité à l'entrée de la tranche : il résulte nécessairement de cette dernière supposition que l'intensité d'un rayon qui a traversé un milieu diminue en progression géométrique quand l'épaisseur augmente en progression arithmétique, et que, si on désigne par i l'intensité du rayon incident, par a le rapport constant entre l'intensité du rayon à la sortie et à l'entrée d'une même tranche, dont l'épaisseur est prise pour unité, ia^e représentera l'intensité du rayon émergent qui a traversé une épaisseur égale à e. Cette formule satisfait complétement aux phénomènes observés. D'abord on a reconnu que, quand l'épaisseur des milieux colorés diminue, leur teinte s'affaiblit, et ils deviennent tout à fait incolores quand leur épaisseur est très-petite; cette circonstance est indiquée par la formule : car, si $e = 0$, l'intensité du rayon transmis est indépendante de sa teinte. En second lieu, on a reconnu que la teinte des milieux colorés, dont on fait croître successivement l'épaisseur, augmente d'abord très-rapidement et ensuite très-peu; par exemple, en renfermant un liquide coloré entre deux lames de verre très-peu inclinées, dans l'arête même du prisme liquide la teinte est blanche, elle se fonce rapidement quand on s'éloigne du sommet du prisme, mais à une certaine distance la teinte augmente d'une manière presque insensible. La formule précédente s'accorde encore très-bien avec ce mode de variations. Enfin cette même formule explique la variation de teintes de certains milieux quand on augmente leur épaisseur; par exemple, les verres et les liquides jaunes sous une petite épaisseur deviennent rouges lorsque l'épaisseur est très-grande, une dissolution d'hydrochlorate de chrome passe par l'augmentation d'épaisseur du vert au rouge. Pour expliquer ce phénomène il suffit d'admettre que les corps qui prennent successivement deux teintes différentes laissent passer ces rayons en plus grande proportion que tous les autres, et que les coefficients de transmission sont en sens contraire des intensités de ces rayons dans la lumière blanche; par exemple, pour les corps jaunes qui deviennent rouges sous une grande épaisseur, il faut admettre que, si i et a, i' et a', représentent les quantités analogues pour les rayons jaunes et les rayons rouges, on a $i > i'$ et $a < a'$: alors les rayons jaunes pourront être dominants pour les petites épaisseurs, et à une certaine limite ce seront les rayons rouges.

1282. L'hypothèse que nous venons d'exposer, et qui est connue depuis longtemps, est identique avec la théorie de la propagation de la chaleur rayonnante à laquelle M. Biot a été conduit par la comparaison des résultats des expériences de M. Melloni (481) : ainsi, en conservant la même notation, nous aurons pour l'intensité du faisceau émergent exactement la même formule.

En parlant du calorique rayonnant nous avons admis que les pouvoirs réfléchissants sous l'incidence perpendiculaire étaient les mêmes pour tous les corps diathermanes et pour tous les rayons, attendu que les expériences n'ont donné que des différences trop petites pour ne pas

Digitized by Google

être attribuées aux erreurs des expériences mêmes. Mais pour la lumière, il est bien démontré, ainsi que nous le verrons plus loin, que l'intensité du rayon réfléchi sous l'incidence perpendiculaire est égale à l'intensité du rayon incident multipliée par le carré du rapport de $n-1$ à $n+1$, n étant l'indice de réfraction de ce rayon ; ainsi l'intensité du rayon réfléchi varie d'un rayon à un autre, à la vérité dans des limites peu étendues pour un même corps, mais qui sont différentes pour les différents corps ; alors la formule générale de l'intensité du rayon émergent est

$$\Sigma\,(1-R)\,(1-R')\,ia^{\circ} \quad \text{ou} \quad \Sigma\left[1-\left(\frac{n-1}{n+1}\right)^{2}\right]^{2} ia^{\circ};$$

il est même très-probable qu'il en est ainsi pour le calorique rayonnant.

1283. L'analogie déjà si remarquable entre la lumière et le calorique rayonnant le devient encore davantage en calculant la quantité de lumière émergente à travers une lame de verre dont l'indice est 3/2 : on trouve 0,921, le même chiffre qui représente la quantité de chaleur émise après les deux réflexions à la première et à la deuxième surface.

1284. Lorsqu'on augmente l'épaisseur d'un verre coloré, on diminue toujours davantage le nombre des rayons de différentes teintes qui le traversent ; mais on peut obtenir plus facilement des teintes parfaitement homogènes en employant plusieurs verres. Par exemple, un verre bleu d'azur et un verre rouge d'une couleur pleine ne laissent passer que le rouge extrême ; en ajoutant à ces deux verres un verre vert, on obtient une opacité complète.

1285. Lorsqu'on place un verre coloré dans un faisceau de rayons solaires qui sort d'un prisme de verre blanc, et qu'on met l'œil derrière le verre, on n'aperçoit qu'un certain nombre de teintes séparées par des bandes noires, correspondantes aux rayons absorbés par le verre.

1286. Il existe un grand nombre de cristaux qui jouissent de la singulière propriété d'absorber inégalement la lumière, ou d'avoir des teintes différentes dans différentes directions. Nous reviendrons plus tard sur cet objet.

1287. L'absorption inégale des rayons de différentes couleurs par les corps fournit une explication très-probable des couleurs des corps, en admettant qu'une certaine partie de la lumière qu'ils réfléchissent a été à une certaine profondeur très-petite, mais suffisante pour que l'inégalité d'absorption ait donné aux rayons réfléchis une certaine teinte. D'après ce que nous avons dit précédemment sur la transparence des corps opaques quand ils sont réduits en lames très-minces, cette explication leur est applicable, comme aux corps transparents.

La lumière des corps opaques renferme toujours une certaine quantité de lumière blanche, qu'on peut diminuer à volonté en faisant éprouver à cette lumière une série de réflexions successives sur les mêmes corps. Par exemple, en plaçant deux lames de cuivre parallèlement, et recevant la lumière après un nombre croissant de réflexions, elle prend une teinte rouge de plus en plus foncée.

§ II. *De la vision.*

1288. *Structure de l'œil.* L'organe de la vision chez l'homme consiste en un globe ovoïde, environné d'un coussin de graisse, et logé dans une cavité osseuse du crâne. Les paupières sont destinées à le recouvrir d'une couche liquide qui se renouvelle à mesure que l'évaporation la fait disparaître ; les cils qui bordent les paupières s'opposent à l'introduction des petites poussières qui blesseraient l'œil ou terniraient sa surface ; les sourcils qui couronnent l'orbite sont destinés à détourner la sueur qui s'écoule souvent du front. Le globe de l'œil est formé d'une enveloppe extérieure,

Digitized by Google

blanche et opaque dans la partie postérieure, et transparente dans la partie antérieure : la partie opaque *AEDFB* (*fig.* 791) porte le nom de *sclérotique* ou de *cornée opaque;* l'autre partie *AB* porte le nom de *cornée transparente*. La cornée opaque est recouverte intérieurement d'une membrane désignée sous le nom de *choroïde;* elle est enduite d'une liqueur noire d'une teinte très-foncée. Le nerf optique pénètre dans l'œil à côté de l'axe vers le nez, et s'épanouit au fond de l'œil sur la choroïde en une membrane mince d'un gris blanchâtre, qu'on nomme *rétine;* la rétine est percée, dans la direction de l'axe de l'œil, d'un très-petit orifice, qui laisse la choroïde à nu. Derrière la cornée transparente se trouve une bande circulaire opaque, de couleur variable, désignée sous le nom d'*iris;* elle est percée d'une ouverture circulaire qui porte le nom de *pupille;* l'ouverture de la pupille peut se contracter et se dilater. Derrière la pupille est placé un corps lenticulaire *CC*, d'une matière solide et transparente, désigné sous le nom de *cristallin;* il paraît immobile. Enfin, l'espace compris entre la cornée transparente et le cristallin est rempli d'une liqueur désignée sous le nom d'*humeur aqueuse*, et l'espace compris entre le cristallin et le fond de l'œil est occupé par une matière gélatineuse qui porte le nom d'*humeur vitrée;* ces deux humeurs sont d'une transparence parfaite.

1289. *Marche des rayons dans l'œil.* Les rayons qui viennent frapper la cornée transparente la traversent en se rapprochant; les rayons d'une trop grande obliquité sont rejetés par l'iris; ceux qui sont admis par la pupille se rapprochent encore en traversant le cristallin, et vont former sur la rétine une image renversée des objets extérieurs. Ces images peuvent facilement se reconnaître en prenant un œil de bœuf extrait peu de temps après sa mort : amincissant postérieurement la sclérotique, et la plaçant entre l'œil et un objet éclairé, on aperçoit par transparence l'image renversée du corps éclairé. On peut faire cette expérience d'une manière plus simple sur les yeux des animaux albinos : car, la liqueur noire de la choroïde n'existant pas, et la sclérotique étant transparente, on aperçoit immédiatement l'image.

On pense généralement que c'est l'image formée sur la rétine qui est la cause de la sensation; mais il existe plusieurs faits difficilement conciliables avec cette supposition. 1° Lorsque l'image se forme sur la base du nerf optique, elle n'est point perceptible; 2° quand l'image se forme dans l'axe même de l'œil, c'est alors que la sensation est la plus nette; et cependant l'image, si elle est très-petite, correspond à l'orifice de la rétine, et se fait alors sur la choroïde. Il paraîtrait d'après cela que l'image se forme sur la choroïde, et que cette membrane, modifiée d'une certaine manière, agit ensuite sur la rétine; la structure de l'œil de la sèche rend cette dernière hypothèse bien plus probable encore. Dans ce mollusque un enduit membraneux est interposé entre la rétine et l'humeur vitrée, de manière que les images ne peuvent pas se former sur la rétine, mais seulement sur la membrane qui la recouvre. Pour reconnaître qu'un objet disparaît quand son image se forme sur la base du nerf optique, il faut placer sur une feuille de papier trois taches circulaires sur la même ligne horizontale, et éloignées de 2 pouces. On ferme un œil, on regarde la tache centrale, et on s'éloigne, de manière que l'axe de l'œil soit perpendiculaire au papier, à une distance de 10 à 12 pouces : l'image de l'objet le plus éloigné du nez disparaît, tandis que celles des deux autres restent toujours visibles.

Nous rapporterons un phénomène assez remarquable, qui se déduit bien facilement de la marche des rayons dans l'œil. Lorsqu'on place très-près de l'œil une carte percée d'un petit trou, et entre l'œil et le trou une tête d'épingle, on aperçoit l'ombre renversée de l'épingle. Cet effet résulte de ce que la lumière émanée du trou projette sur la rétine l'ombre droite de l'épingle, attendu que pour cette distance le foyer est derrière la lentille : alors l'objet paraît renversé.

Digitized by Google

1290. Les images que l'on obtient au moyen des lentilles ordinaires ont deux imperfections, qui n'existent point dans les images qui se forment sur la rétine : l'une vient de ce que les bords des lentilles ne concentrent pas les rayons rigoureusement au même foyer que ceux qui sont voisins du centre (on la désigne sous le nom d'*aberration de sphéricité*), l'autre provient de ce que les rayons de différentes couleurs, ayant des réfrangibilités différentes, forment des foyers distincts : on la désigne sous le nom d'*aberration de réfrangibilité*. De la première il résulte que les images doivent être un peu diffuses ; et de la seconde, qu'elles doivent être terminées par des franges irisées, à cause des différences de position des images de différentes couleurs : il faut donc admettre que les parties de l'œil sont disposées de manière à faire disparaître ces aberrations. On admet assez généralement que l'aberration de sphéricité est en grande partie compensée par l'iris qui intercepte les rayons trop obliques, par la structure du cristallin, qui fait converger sensiblement au même point les rayons qui le traversent, et enfin par la courbure de la rétine. Quant à l'aberration de réfrangibilité, on peut comprendre qu'elle soit sensiblement nulle, par cela seul que les rayons parcourent des chemins trop petits pour que les objets soient terminés par des franges colorées d'une étendue appréciable.

1291. *Distance de la vision distincte.* L'œil perçoit des images distinctes à toutes les distances; mais les objets doivent être d'autant plus grands qu'ils sont plus éloignés, parce qu'alors le défaut de netteté des contours ne déforme pas sensiblement les images. Mais quand les objets ont de petites dimensions, comme les caractères d'un livre, ils ne peuvent être vus qu'à une distance déterminée, ou du moins quand leur distance est comprise entre certaines limites : cette distance porte le nom de *distance de la vision distincte*. On peut facilement reconnaître et mesurer cette distance en prenant une règle noire de $0^m,80$ de longueur, au milieu de laquelle on a tendu un fil de soie très-blanche : en plaçant l'œil vers l'extrémité de la règle et un peu au-dessus, le fil semble terminé par deux lignes qui se croisent. C'est au point de croisement que la vision est distincte ; souvent le fil paraît d'un diamètre constant dans une certaine étendue qui fixe alors les limites de la vision distincte. La distance de la vision distincte pour les très-petits objets est d'environ 10 à 11 pouces.

Jusqu'ici on a vainement cherché à rendre compte de la variation de la vision distincte. On sait que, quand une lentille forme une image derrière elle, la distance de l'image à la lentille varie avec celle de l'objet à la lentille : ainsi l'image qui se forme derrière le cristallin se trouve à des distances variables avec la distance de l'objet ; et cependant, pour que la vision soit nette, il semble que cette image doit se former sur la rétine, et pour cela on a fait un grand nombre d'hypothèses. On a supposé que le globe de l'œil s'aplatissait quand les objets s'éloignaient; mais l'étendue du mouvement qu'il devrait éprouver a fait renoncer à cette hypothèse. On a supposé ensuite que c'était la cornée transparente qui s'aplatissait ; mais, les images observées par réflexion sur cette membrane lorsqu'on voit de près et de loin n'éprouvant pas de variations, on a encore rejeté cette hypothèse. On a ensuite supposé que le cristallin éprouvait des variations de courbure ; mais les personnes chez lesquelles le cristallin a disparu par suite de l'opération de la cataracte voyant distinctement à différentes distances au moyen d'un seul verre lenticulaire, on a encore été obligé d'abandonner cette explication. On a prétendu que la cause de la variation de la vision distincte provenait uniquement de la variation de l'ouverture de la pupille ; la pupille s'ouvre pour les objets éloignés, et se resserre pour les objets voisins. Le cristallin étant formé de couches concentriques, de densités et de courbures décroissantes à partir du centre, on admettait que les rayons qui traversaient le cristallin près du centre étaient plus convergents que ceux qui le traversaient près des bords, c'est le contraire

Digitized by Google

dans les lentilles homogènes. Alors, lorsqu'un objet était placé près de l'œil, la pupille se fermait pour n'admettre que les rayons les plus convergents, les autres ayant leurs foyers au delà de la rétine; et quand l'objet était très-éloigné, la pupille s'ouvrait pour admettre les rayons qui traversaient le cristallin près des bords, et qui venaient converger sur la rétine; et on disait que les rayons plus voisins du centre, ayant leur foyer en avant de la rétine, ne produisaient sur elle qu'un effet insensible à cause de leur divergence et de leur plus faible intensité. Cette hypothèse était appuyée sur ce fait, qu'on peut voir des objets placés très-près de l'œil en les observant à travers un petit trou; mais il y a à cette dernière hypothèse une objection décisive : on voit aussi nettement des objets très-éloignés en les regardant à travers un trou d'épingle percé dans une carte qu'à l'œil nu. Enfin, on a prétendu que la netteté de la vision à différentes distances provenait non pas de ce que le foyer était toujours sur la rétine, mais de ce que la variation qu'éprouvait la distance focale était assez petite pour que l'image formée sur la rétine conservât une netteté suffisante; et on a appuyé cette hypothèse sur ce qui se passe dans les lentilles ordinaires lorsqu'on reçoit l'image sur un écran : une petite variation dans la position de l'écran, l'objet restant immobile, ou une variation dans la position de l'objet, l'écran restant fixe, ne change pas sensiblement la netteté de l'image. Mais il faudrait s'assurer de l'étendue de la variation de la distance focale dans l'œil lorsque l'objet éprouve les variations de distance dans lesquelles la vision ne cesse pas d'être distincte, et reconnaître que dans l'étendue de ces variations l'image ne cesse pas d'être nette. Cette hypothèse acquerrait une certaine probabilité si on supposait que l'œil est disposé pour voir nettement à de très-grandes distances : car on pourrait admettre que le rétrécissement de la pupille produit la netteté de la vision à des distances plus petites. Tout cela n'est pas très-satisfaisant, et il faut avouer que l'explication de la netteté de la vision à des distances si différentes est encore à trouver.

1292. *Sensation de la lumière.* Tout ce que nous savons sur la vision se borne à ce qu'il se forme sur la rétine une image renversée des objets extérieurs. Mais cette image n'est que la cause de la sensation; la modification quelconque qu'éprouve la rétine se transmet au cerveau par le nerf optique, et c'est là qu'a réellement lieu la sensation. Lorsqu'on regarde avec un œil, l'objet est vu dans la direction du cône de lumière incident, et à la distance du sommet de ce cône. Il paraît que le mouvement instinctif de la pupille, pour établir le foyer sur la rétine, fait apprécier l'inclinaison des rayons incidents. Quand on regarde avec les deux yeux, l'estimation de la distance se fait principalement par l'angle des axes des yeux : aussi, dans ce cas, l'appréciation de la distance est beaucoup plus exacte; mais elle cesse de l'être quand l'objet est très-éloigné, parce qu'alors les axes sont presque parallèles. Quant au jugement que nous portons sur la grandeur absolue des corps, il résulte de leur diamètre apparent, c'est-à-dire de l'angle formé par les rayons qui partent de leurs extrémités, et de l'idée de leur distance.

Lorsqu'on fixe l'œil successivement sur deux objets qui restent dans le champ de la vision, les objets ne changent pas de place; il résulte de là que l'œil tourne autour du centre optique. On conçoit facilement que, quoique les images formées au fond de l'œil soient renversées, nous voyons les objets droits : car chaque point est vu dans la direction de la ligne qui passe par ce point et le centre optique, et ce centre est en avant de la rétine.

Les deux images qui se forment dans les deux yeux ne donnent qu'une seule sensation, parce que les nerfs optiques se réunissent en pénétrant dans le cerveau; mais il faut cependant que les images soient placés sur des points correspondants des deux rétines : autrement elles deviennent distinctes toutes deux. C'est ce que l'on peut faci-

Digitized by Google

lement vérifier en pressant un œil avec le doigt pour le déranger de sa position.

1293. *Durée de la sensation.* La sensation dans l'œil n'est point instantanée, elle a une certaine durée : on le démontre par une expérience bien simple. Lorsqu'on fait tourner rapidement un morceau de bois dont une des extrémités est incandescente, on aperçoit une ligne lumineuse continue. On pourrait même se servir de cet appareil pour mesurer la durée de la sensation, ou du moins la durée pendant laquelle la sensation reste sensiblement constante, il suffirait de faire varier la vitesse de rotation, jusqu'à ce qu'on aperçût un cercle complet d'une teinte uniforme. La mesure de la durée de la sensation peut s'effectuer d'une manière plus exacte au moyen de l'appareil suivant, dû à M. Aimé. Imaginons deux cercles de carton, montés sur le même axe, et se mouvant en sens contraire avec des vitesses égales; supposons que le premier soit percé d'un grand nombre d'ouvertures égales et également espacées, et que le second soit percé d'un seul orifice : si, l'œil étant placé sur l'axe de rotation, l'appareil reçoit un large faisceau de lumière parallèle à l'axe de rotation, la rotation étant d'abord très-lente, l'orifice unique du cercle qui se trouve en avant paraîtra éclairé aux époques des coïncidences avec les orifices du premier cercle; mais, quand la vitesse aura dépassé une certaine limite, la première apparition subsistera avec la suivante, ou les deux suivantes, si la durée de la sensation est égale à l'intervalle de temps qui sépare deux apparitions, ou au double de cet intervalle. Ainsi quand on aura obtenu un nombre quelconque d'apparitions simultanées, les vitesses de rotation et le nombre des orifices du premier disque conduiront facilement à une valeur approximative de la durée de la sensation. M. Plateau a trouvé par ces différentes méthodes 1° que la durée totale des impressions sur la rétine était sensiblement la même pour les différentes couleurs, et approximativement de 0″, 34; 2° qu'il faut un temps très-sensible pour que l'impression sur la rétine soit complète; 3° que la durée pendant laquelle l'impression conserve sensiblement la même intensité est d'autant plus grande que l'impression est plus faible; 4° que ce temps, pour un papier blanc éclairé par la lumière du jour, est moindre que 0″,008; qu'il est plus grand pour un papier rouge, et plus grand encore pour un papier bleu; 5° que la durée totale est d'autant plus grande que l'impression a été plus intense; qu'elle est d'autant plus grande qu'on a regardé l'objet pendant un temps plus court, pourvu que ce temps ait été suffisant pour développer une impression complète; 6° que quand l'objet est très-lumineux, et qu'après l'avoir contemplé quelque temps, on se couvre subitement les yeux, l'impression disparaît et reparaît plusieurs fois avec des teintes complémentaires.

Nous décrirons plusieurs phénomènes curieux qui dépendent de la persistance des impressions sur la rétine.

1294. Imaginons qu'une roue garnie de plusieurs rais noirs ou seulement obscurs tourne avec une grande vitesse autour de son axe sur un fond blanc, on apercevra une teinte uniforme dans chaque circonférence concentrique à l'axe de rotation, et qui résulte d'un mélange de blanc et de la teinte des rais : si par exemple, chaque rais était formé par deux rayons, en désignant par m le nombre des degrés occupés par la somme des rais, la teinte résulterait d'un mélange de blanc et de la couleur des rais dans le rapport de $360° - m$ à m. Si plusieurs roues placées sur le même axe tournaient avec la même vitesse, l'effet serait encore le même, seulement la teinte serait plus foncée; mais si les vitesses étaient différentes, les rais se rencontreraient périodiquement, et si ces coïncidences se manifestaient toujours dans les mêmes lieux et à des intervalles plus petits que la durée de la sensation, on verrait une roue fixe d'une teinte plus claire que le fond, dont les rais seraient les lieux des coïncidences : car pour tous les lieux de coïncidence la teinte se compose de celle du fond et de

Digitized by Google

la teinte d'un seul rais, tandis que pour tous les autres points elle se compose de celles du fond et de celles de deux rais; et si les lieux de coïncidence se déplaçaient successivement d'une petite quantité, la roue paraîtrait avoir un mouvement de rotation. On conçoit facilement d'après cela que, si les roues n'étaient pas placées sur le même axe, il se produirait des images fixes ou mobiles de formes très-variées.

1295. Concevons un cercle de carton mobile autour de son centre, et percé près de la circonférence d'un grand nombre de trous également espacés, et au-dessous de chacun d'eux des figures représentant les différentes phases successives du mouvement d'un même objet, divisé en autant de parties qu'il y a de trous. Si on place le carton devant un miroir, et si on lui imprime un mouvement de rotation rapide, en regardant dans la glace au delà du carton, on ne distingue aucune figure, on voit seulement des cercles colorés concentriques; mais, si on regarde dans la glace à travers les trous du carton, on voit une image distincte, et chaque figure paraît animée du mouvement dont l'ensemble des figures présente les différentes phases. On en concevra facilement la raison, en remarquant que l'image du carton, dans une des positions qu'il prend successivement, est visible pendant la durée du passage devant l'œil de l'intervalle qui sépare deux trous: par conséquent, si le mouvement est assez lent pour que cette durée soit sensiblement celle de la sensation, les images correspondantes aux phases successives du mouvement de la figure se succèderont dans le même lieu, et produiront la même apparence que si la figure se mouvait elle-même. Cette jolie expérience est due à M. Plateau de Bruxelles.

1296. Nous pouvons maintenant comprendre l'appareil employé par M. Savart pour reconnaître la constitution des veines liquides (240). Imaginons que de petits globules partent d'un même point à des intervalles de temps égaux très-petits, et changent de forme dans leur chute, de la même manière, à des distances périodiques égales entre elles: il est facile de voir que, si le temps qu'un des globules met à parcourir une distance égale à celle qui sépare deux globules successifs est plus petite que la durée de la sensation, l'œil apercevra une surface continue qui sera la surface enveloppe d'un seul globule dans toutes les positions qu'il occupe successivement. Supposons maintenant que derrière la veine, formée par un liquide opaque, on place une bande noire annulaire, verticale, mobile sur deux rouleaux et sur laquelle on ait tracé des lignes blanches horizontales également espacées, si on donne à la bande noire un mouvement vertical de bas en haut, par la rotation des rouleaux, tel, que la vitesse soit à celle des globules dans le rapport de l'écartement des raies à celle des globules, il est évident que les raies et les globules arriveront en même temps à des hauteurs éloignées les unes des autres de la distance des globules; et, comme les coïncidences se succèderont à des intervalles très-petits, il en résultera une sensation continue, et chacune des images distinctes sera un rectangle ayant pour largeur celle du globule, et une longueur constante dépendant uniquement de la largeur des raies, et des vitesses des globules et des raies. On pourra alors apprécier les variations de forme des globules, car on obtiendra les largeurs des globules à certaines hauteurs, et on en déduira facilement le diamètre vertical, attendu que leur volume reste constant. Cette expérience suppose cependant qu'on donne aux raies une certaine vitesse, dépendant de l'écartement des globules et des raies, et de la vitesse des premières, vitesse qu'il serait impossible de calculer, mais qu'on obtient facilement par tâtonnement, car la vitesse en question est la seule qui donne des coïncidences à des hauteurs constantes, et pour laquelle les images aient des dimensions fixes.

1297. *Images accidentelles.* Si on regarde fixement un objet éclairé placé sur un fond noir, en tenant l'œil constamment attaché sur le même point, et si ensuite on

Digitized by Google

porte subitement les yeux sur une surface blanche, ou si on ferme les yeux en les couvrant avec un mouchoir, on voit une image de l'objet, mais d'une couleur complémentaire : c'est cette image qu'on désigne sous le nom d'*image accidentelle*. L'image accidentelle d'un objet rouge est verte, celle d'un objet jaune est bleue. La durée de l'image accidentelle et d'autant plus grande que l'objet a été regardé plus longtemps.

La disparition des images accidentelles n'a pas lieu en général par un décroissement d'intensité graduel et continu; elle présente au contraire ordinairement des variations périodiques d'intensité; quelquefois même on voit reparaître l'impression primitive. Pour observer ces phénomènes, on prend un tube noirci, d'environ $0^m,50$ de longueur, et de $0^m,05$ de diamètre; on regarde fixement à travers ce tube, pendant une minute au moins, un papier rouge bien éclairé et suffisamment étendu pour que les bords en soient cachés par le tube; ensuite, sans découvrir l'œil fermé, on regarde le plafond blanc de l'appartement : on voit d'abord une image circulaire verte, qui est ensuite remplacée par une image rouge d'une faible intensité et d'une courte durée, après quoi revient une image verte, puis une nouvelle image rouge; ces alternatives se succèdent jusqu'à quatre, mais les intensités des images vont continuellement en s'affaiblissant (M. Plateau).

Les couleurs accidentelles se combinent entre elles de la même manière que les couleurs réelles. En effet, si on place l'un à côté de l'autre, sur un fond noir, deux petits carrés de papier coloré, l'un violet, l'autre orangé, couleurs dont les accidentelles sont le jaune et le bleu, et si on marque d'un point noir le milieu de chacun des carrés, et qu'après avoir fixé alternativement les yeux sur chacun d'eux pendant au moins une seconde et à plusieurs reprises, on ferme les yeux, ou bien qu'on les dirige sur une surface blanche, on distingue trois carrés juxtaposés : les deux extrêmes sont bleu et jaune et celui du milieu est vert. Mais quand les deux couleurs primitives sont complémentaires, les deux teintes accidentelles par leur superposition produisent du noir.

Les couleurs accidentelles se combinent avec les couleurs réelles comme ces dernières entre elles; c'est ce qu'on peut facilement reconnaître en projetant l'image accidentelle sur un fond coloré; mais quand les images accidentelles se mêlent avec des images directes complémentaires, l'effet résultant est d'un gris plus ou moins foncé.

Les phénomènes que nous venons de décrire succèdent à la vision directe de l'objet, mais pendant sa contemplation même il se produit des phénomènes analogues. Si on regarde fixement un carré de papier rouge sur un fond blanc, on voit après un certain temps une auréole verte qui s'étend à une certaine distance. Si on place entre une fenêtre et l'œil un papier coloré transparent, et si on applique sur ce papier une petite bande de carton blanc, elle paraît colorée d'une couleur complémentaire. Les ombres produites sur un mur blanc au lever et au coucher du soleil paraissent bleues ou vertes, à cause de la teinte rougeâtre de la lumière. On conçoit facilement d'après cela l'influence réciproque des couleurs voisines; chacune d'elles produisant sur l'autre une teinte complémentaire à la sienne, on voit que les teintes s'aviveront mutuellement quand elles seront complémentaires, et que dans le cas contraire elles se modifieront.

On observe quelquefois au delà de l'espace occupé par l'auréole accidentelle d'une teinte complémentaire à celle de l'objet une faible nuance de la teinte de l'objet.

Plusieurs hypothèses ont été proposées successivement pour expliquer ces phénomènes. La plus généralement adoptée était celle de Scherffer, qui consistait à admettre que l'action continue des rayons d'une certaine couleur sur une partie de la rétine

Digitized by Google

en diminue momentanément la sensibilité pour les rayons de cette couleur. Cette explication s'applique très-bien aux couleurs accidentelles qu'on aperçoit en dirigeant la vue sur un fond blanc, après la contemplation d'un objet coloré, mais elle n'explique point la production des images accidentelles quand les yeux sont fermés, ni beaucoup d'autres particularités des images accidentelles. La seule explication généralement admise maintenant, et qui s'accorde parfaitement avec tous les faits, est due à M. Plateau. Ce physicien suppose que quand la rétine a été ébranlée, et que la cause d'excitation cesse, la rétine ne revient à sa position normale que par une série d'oscillations décroissantes, et que les états par lesquels elle repasse successivement produisent des sensations opposées, et enfin que pendant la durée même de l'excitation l'ébranlement de la rétine s'étend au delà des points directement ébranlés, mais en changeant de nature comme les ébranlements d'une membrane tendue. Cette explication n'est évidemment que la traduction des faits que nous avons rapportés.

1298. *Irradiations.* L'impression faite sur la rétine s'étend au delà de l'image réelle, et d'autant plus que la lumière est plus vive : ainsi, deux cercles égaux, l'un noir sur un fond blanc, l'autre blanc sur un fond noir, ne paraissent pas du même diamètre; le dernier paraît plus grand que le premier. C'est dans ce phénomène que consiste l'irradiation.

1299. *Des raies qu'on aperçoit à l'œil nu en regardant à travers une fente étroite placée à une distance de l'œil plus petite que la distance de la vision distincte.* Ces raies, qu'on aperçoit facilement en regardant le ciel à travers une fente d'un demi millimètre de diamètre, sont seulement obscures, irrégulièrement distribuées dans la fente, mais toujours de la même manière, quelles que soient la grandeur, la forme et la nature du corps éclairant; elles ne changent même pas quand le corps éclairant est assez étroit pour donner des franges par diffraction; et quand on couvre une partie de la fente par un verre coloré, les raies vues à travers le verre sont sur le prolongement des raies qui se forment dans la partie libre de la fente. Ces raies changent de place et s'affaiblissent quand on augmente la largeur de la fente; au delà d'un millimètre on n'en aperçoit plus que de très-faibles, placées près des côtés de la fente. Lorsqu'on éloigne la fente, les raies deviennent moins nombreuses, plus nettes, et disparaissent complétement à la distance de la vision distincte. Lorsqu'on place une fente étroite devant l'œil, et qu'on incline la fente ou la tête, les raies changent de place et de disposition. Il résulte évidemment de ce qui précède que les raies dont il est question se forment dans l'œil. On en explique très-bien la formation en admettant qu'il existe dans l'œil un certain nombre de points obscurs d'un très-petit diamètre; car chaque point lumineux de la fente projettera sur la rétine une ombre de ce point, la suite des ombres formées par les différents points de la fente formera une ligne obscure parallèle à la fente, et cette hypothèse satisfait à toutes les particularités du phénomène.

On peut d'ailleurs constater par des expériences décisives l'exactitude de l'explication précédente. Si on place entre l'œil et une fente étroite une lame de verre sur laquelle on a fait avec de l'encre de Chine un point noir très-petit, on voit une raie obscure parallèle à la fente. Si on regarde le ciel à travers une fente étroite dont on puisse à volonté diminuer la longueur au moyen d'une plaque mobile dont le bord est perpendiculaire à la fente, quand la fente a une longueur qui diffère peu de sa largeur, on aperçoit un champ circulaire parsemé de points obscurs, toujours disposés de la même manière par rapport à l'œil; si on allonge la fente, chaque point obscur produit une raie. Quant à la nature des points obscurs de l'œil, je pense qu'ils proviennent de la structure mamelonnée de la cornée transparente ou de l'enveloppe

Digitized by Google

de l'humeur aqueuse : car chaque petit mamelon se comporterait comme une lentille d'un court foyer, la lumière qui les aurait traversés se disperserait dans un cône très-ouvert, et chacun d'eux porterait sur la rétine une ombre comme un corps opaque.

1300. *Perspective.* Un point lumineux étant vu sur l'axe du faisceau lumineux qu'il envoie à l'œil, il en résulte que les contours des images sont sur la surface d'un cône qui a pour centre celui de la pupille, et qui est tangent aux bords du corps; et que l'image formée sur la rétine est semblable à une section du cône perpendiculaire à son axe : ainsi toutes les sections de ce cône par des surfaces planes ou courbes formeront sur la rétine des images terminées par les mêmes contours. La section de ce cône par un plan porte le nom de *perspective*. Il en résulte que pour avoir la perspective d'un objet quelconque il faut par tous les points de ce corps et par l'œil mener des lignes droites, et déterminer l'intersection de ce système de lignes par un plan qui occupe la position du tableau sur lequel la perspective doit être rapportée. D'après ce qui précède, si l'œil était placé au sommet d'un cône, une ligne quelconque tracée sur sa surface aurait la même apparence que la base du cône. On conçoit alors que des figures tracées sur une surface changent complétement avec la position de l'œil; et que, si on traçait sur un mur une figure régulière vue d'un point voisin de sa surface et très-éloigné, cette figure pour l'œil placé en face pourrait être très-déformée. Ces figures portent le nom d'*anamorphoses*.

1301. *Accidents de la vue.* La distance de la vue distincte n'est pas la même chez tous les individus. Avec l'âge, la partie antérieure de l'œil s'aplatit, et par conséquent la convergence des rayons lumineux diminue; il faut alors, pour que les rayons forment leur foyer sur la rétine, que la divergence des rayons qui arrivent à l'œil soit très-petite, et par conséquent que les objets soient éloignés. Cet état de l'œil a reçu le nom de *presbytisme;* on y remédie en fixant devant l'œil une lentille convergente : car, la divergence des rayons étant diminuée par l'interposition de la lentille, tout se passe comme si les rayons partaient de plus loin. On rencontre souvent et dans tous les âges le défaut opposé, qu'on désigne sous le nom de *myopisme;* la cornée transparente étant trop convexe, les rayons deviennent trop convergents, les foyers des objets éloignés se forment en avant de la rétine, et la vision est confuse. On obvie à cet inconvénient en plaçant devant l'œil une lentille divergente : la divergence des rayons incidents se trouve alors augmentée, et tout se passe comme si l'objet était plus rappproché. Pendant longtemps on a uniquement employé des verres bi-convexes ou bi-concaves; mais Wollaston a proposé l'usage des verres concaves-convexes (2mes lentilles des *fig.* 753 et 754), afin de distinguer plus nettement les objets placés très-obliquement : pour cet usage, ces verres portent le nom de *périscopiques*. Dans les lentilles périscopiques le champ est augmenté; mais les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité sont plus grandes.

Lorsqu'on connaît la distance de la vue distincte d'un presbyte ou d'un myope, il est très-facile de déterminer les foyers des lentilles convergentes ou divergentes qui leur conviennent. En effet, désignons par a la distance de la vue distincte ordinaire, et par b la distance de la vue distincte du presbyte ou du myope, et par x la distance focale principale de la lentille.

Dans le premier cas, la lentille doit être convergente, et un objet placé à la distance a doit faire son foyer à la distance b : nous avons alors entre les quantités a, b et x, la relation

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{x}, \quad \text{d'où} \quad x = \frac{ab}{b-a}.$$

(dans cette formule nous avons changé le signe de b, parce que les deux foyers conjugués

Digitized by Google

sont du même côté de la lentille). Par exemple, si la distance de la vue distincte du presbyte était de 30 pouces, la distance de la vision distincte ordinaire étant de 10 pouces, on aurait

$$x = \frac{30 \times 10}{30 - 10} = 15.$$

Dans le cas du myopisme, en conservant la même notation, nous aurons

$$-\frac{1}{b} + \frac{1}{a} = -\frac{1}{x}; \text{ d'où } x = \frac{ab}{a - b}.$$

1302. On rencontre chez quelques individus une affection singulière de la rétine, qui consiste dans l'inaptitude à percevoir certaines couleurs, et principalement le rouge. Je citerai deux frères que j'ai eu l'occasion d'observer, et dont l'un était élève de l'école centrale. Ayant tracé sur du papier des teintes de différentes couleurs numérotées, je demandai successivement à chacun d'eux les numéros des teintes qui leur paraissaient identiques, ou du moins qui ne différaient que par l'intensité. Les jugements des deux frères furent les mêmes; pour eux, le carmin, le violet et le bleu étaient des couleurs identiques, et ils confondaient complétement le rouge du peroxyde de fer avec le vert, le rouge-garance des pantalons des troupes avec le vert des arbres; le jaune était une couleur bien distincte, d'un grand éclat. Ces faits s'expliquent facilement en admettant que ces jeunes gens ne voyaient pas le rouge; pour eux les objets devaient se présenter sous le même aspect que quand nous regardons à travers un verre vert.

1303. Wollaston et M. Arago ont éprouvé à plusieurs reprises une anomalie passagère fort singulière dans la vision. Ils ne voyaient que la moitié des objets, toujours une moitié séparée de l'autre par un plan vertical, et la même moitié avec chaque œil; mais tantôt le côté droit, tantôt le côté gauche. Wollaston a déduit de là que c'était le même nerf qui s'épanouissait dans les parties droites de chacune des deux rétines, et le même qui en formait les parties gauches.

§ III. *Appareils et instruments d'optique.*

1304. *Miroirs plans.* Nous avons dit que, quand un point lumineux envoie des rayons sur un miroir plan, tous les rayons réfléchis prolongés passent par un point situé derrière le miroir sur la perpendiculaire abaissée du point lumineux, et à une distance du miroir égale à celle du point lumineux : or, comme l'œil rapporte les objets aux points des concours des derniers rayons qu'il en reçoit, l'image du point lumineux O (*fig.* 792) sera vue en O'. Il est facile de déduire de là que l'objet et son image sont toujours symétriquement placés par rapport au miroir (*fig.* 793).

1305. Si deux miroirs AB et CD (*fig.* 794) sont parallèles, les rayons émanés du point lumineux m pourront arriver à l'œil placé en O après une ou plusieurs réflexions; et, par conséquent, il apercevra dans chacun d'eux une série d'images dont les teintes iront en s'affaiblissant, à mesure que les rayons qui les forment auront subi un plus grand nombre de réflexions. Pour trouver les lieux de ces images il suffit de remarquer que tous les rayons qui ont subi une réflexion vont concourir à la première image : par conséquent, tout se passe comme si cette image était lumineuse. Ainsi, on trouvera l'image qui résulte de deux réflexions en cherchant l'image de a dans le miroir CD, et l'image de b dans le miroir AB; de même, en traçant les images des points a' et b' dans les miroirs AB et CD, on obtiendra celles qui proviennent de trois réflexions, et ainsi de suite. On voit d'après cela que les deux séries d'images

Digitized by Google

sont situées sur une même ligne droite perpendiculaire aux deux miroirs.

1306. Les miroirs en glace étamée présentent une série d'images lorsqu'on regarde la glace sous des angles très-petits. Voici l'explication de ce phénomène. Une partie de la lumière est réfléchie à la première surface de la glace, et donne une première image; une autre partie de la lumière pénètre et se réfléchit contre la surface métallique; mais lorsque cette lumière se présente pour sortir, une portion est réfléchie intérieurement, retourne à la seconde surface, et ainsi de suite. Par conséquent, il y a deux images qui proviennent d'une seule réflexion, l'une à la surface supérieure, l'autre à la surface inférieure, et une suite d'autres images qui proviennent de 3, 5, 7, etc., réflexions; c'est toujours la deuxième image qui est la plus brillante. Elles sont toutes très-rapprochées quand la réflexion a lieu sous un angle un peu considérable, à cause de la petite épaisseur de la glace; pour les distinguer, il faut les observer sous un très-petit angle, afin de les écarter et de les rendre plus brillantes.

On explique facilement d'après cela les anneaux brillants qu'on observe en regardant dans un tube de verre noirci extérieurement, fermé à une extrémité par une feuille de papier percée à son centre d'un trou d'épingle; et il est facile de reconnaître (*fig.* 794 *A*) qu'en désignant par *d* le diamètre intérieur du tube, les diamètres des anneaux sont 2*d*, 4*d*, 6*d*, etc.

1307. Lorsque deux miroirs *AB* et *AC* (*fig.* 795) sont inclinés, il est évident que les images successives des bords des miroirs feront entre elles des angles égaux à celui des deux miroirs; par conséquent, si l'angle *CAB* est une fraction exacte de la circonférence ayant 1 pour numérateur, ces images, après avoir fait une révolution autour du point *A*, se superposeront sur les premières, et l'espace autour du point *A* paraîtra divisé en secteurs égaux. Par la même raison, un objet placé devant les miroirs donnera deux images dans chaque secteur, et l'ensemble de toutes ces images présentera une parfaite symétrie. Mais, pour cela, il faut que l'angle des miroirs soit une partie aliquote de la circonférence : car autrement les séries circulaires d'images ne se superposent qu'en partie, et deviennent diffuses.

C'est sur ce principe que sont construits les petits appareils connus sous le nom de *kaleïdoscopes*. Ils sont formés d'un tuyau circulaire renfermant deux glaces inclinées, réunies sur une arête du tuyau; à une des extrémités, le tuyau est fermé par une plaque percée d'un petit orifice par lequel on regarde, et, à l'autre extrémité, par deux verres plans dont l'un est dépoli, et entre lesquels on met différents petits objets, tels que des morceaux de verre colorés : l'angle des miroirs étant convenable, on voit une figure symétrique, qui change en tournant le cylindre, par le déplacement des objets renfermés entre les deux verres. Le même effet serait produit par une lentille prismatique ayant la forme d'une pyramidale régulière d'un nombre quelconque de faces, l'œil étant placé dans la direction de l'axe.

1308. *Goniomètres*. On désigne ainsi les instruments destinés à mesurer les angles des corps solides. Il en est qui sont formés de deux règles mobiles qu'on applique sur les faces dont on veut mesurer l'inclinaison, et que l'on porte ensuite au centre d'un cercle divisé qui en mesure l'écartement; mais on leur substitue avec avantage les appareils suivants.

1309. *Goniomètre de Charles*. Cet instrument consiste (*fig.* 796) en un cercle de cuivre divisé *AB*, dont le centre reçoit une alidade mobile; à côté se trouve une lunette horizontale fixe *CD* renfermant à son foyer un fil vertical. Pour mesurer les angles d'un cristal, on le fixe au centre de l'alidade avec de la cire; on dirige la lunette sur le cristal; et, en regardant par réflexion successivement sur chacune des deux faces du cristal l'image d'une ligne verticale, on s'assure que la ligne d'intersection des deux faces a cette direction. Alors on dispose l'alidade de manière que

Digitized by Google

l'image soit placée derrière le fil, et on la fait tourner jusqu'à ce que l'image formée sur l'autre face coïncide également avec le fil : l'angle décrit par l'alidade est alors le supplément de l'angle des deux faces du cristal. En effet, soit *o* (*fig.* 797) le centre de rotation, *om* et *on* deux perpendiculaires abaissées du point *o* sur les deux faces du prisme, pour que la face *AC* devienne parallèle à *AB*, la ligne *on* doit prendre la position de *om*, et par conséquent le cristal doit tourner d'un angle *nom* supplément de l'angle *A*.

1310. *Goniomètre de Wollaston.* Cet instrument est fondé sur un principe analogue à celui de Charles; mais il est d'un usage beaucoup plus commode. Imaginons que nous ayons deux mires horizontales très-éloignées, telles que deux arêtes d'un toit, deux lignes horizontales d'un bâtiment, et que le cristal, fixé à un axe horizontal qui peut tourner sur lui-même, soit assez voisin du centre de rotation pour que les angles formés par les rayons d'une même mire qui seraient tangents à la surface qui envelopperait le cristal dans les positions qu'il prend successivement dans une révolution complète soient sensiblement nuls : une des mires, vue sur le prolongement horizontal du cristal, donnera une direction constante. Alors, en faisant coïncider cette direction, que l'œil retrouve toujours facilement, avec l'image de l'autre mire, réfléchie successivement sur les deux faces dont on veut mesurer l'inclinaison, l'angle de rotation sera le supplément de l'angle des deux faces. Voici maintenant les dispositions de l'appareil. Le goniomètre de Wollaston (*fig.* 798) est composé d'un cercle vertical de cuivre, gradué sur son bord, et mobile autour d'un axe *AA* qui est supporté par un pied *CP*; l'axe *AA* est percé dans toute sa longueur pour laisser passer un axe intérieur *aa* dont une des extrémités porte plusieurs pièces à mouvements rectangulaires, sur lesquelles on fixe avec une petite pince le cristal dont on veut mesurer les angles. Pour se servir de cet instrument, on commence par placer le limbe verticalement, et le cristal de manière que l'arête commune des deux faces dont on veut mesurer l'inclinaison soit horizontale; pour remplir cette dernière condition, on regarde des lignes horizontales d'un édifice, et on tourne le cristal jusqu'à ce que les lignes supérieures vues par réflexion soient sur le prolongement des lignes inférieures vues directement : les deux faces remplissant cette condition, leur intersection est horizontale. Pour mesurer l'angle des deux faces, il ne faut plus que répéter cette observation successivement sur l'une et sur l'autre, en faisant mouvoir le cristal avec le limbe au moyen de l'axe *AA* : l'angle décrit est le supplément de l'angle cherché. L'instrument est gradué de manière à donner cet angle lui-même quand on met d'abord l'index sur le zéro.

Nous avons supposé dans ce qui précède qu'on amenait le rayon réfléchi sur le prolongement de l'image directe vue au delà du cristal; mais quand on observe la réflexion près du bord des faces, on voit la mire à travers le cristal, comme si les rayons le traversaient sans éprouver de déviation : on peut alors établir réellement la coïncidence des images. Pour comprendre la cause de ce phénomène, il faut remarquer que la vision d'un point se fait par un faisceau conique de lumière dont le sommet est au point lumineux, et dont la base est la pupille. Si on introduit dans le cône un écran qui intercepte en partie ce faisceau, l'image se fera toujours au même point de la rétine, et le point sera vu dans la même direction, celle de l'axe du cône; seulement l'image sera d'autant plus faible que l'écran interceptera une plus grande partie du faisceau; et si le bord de l'écran dépassait l'axe du cône, la direction de la vision du point lumineux rencontrerait l'écran.

1311. *Chambre claire.* Si on taille un prisme à quatre faces (*fig.* 799) de manière que deux faces soient perpendiculaires, et les deux autres tellement inclinées qu'elles réfléchissent toutes deux les rayons entrés perpendiculairement à l'une des

Digitized by Google

autres faces, et si l'on place l'œil en O de manière que la moitié de la pupille reçoive les rayons réfléchis dans le prisme, et l'autre moitié les rayons émanés d'un papier placé au-dessous, il est évident que l'image des objets extérieurs se projettera droite sur le papier, et que l'œil apercevra en même temps la pointe d'un crayon qu'on promènerait sur sa surface : par conséquent, au moyen de cet appareil, on pourra calquer l'image de l'objet. On pourrait aussi amplifier les images en les regardant avec une loupe. Cet ingénieux instrument est dû à M. Wollaston.

Il est facile de calculer la valeur des angles A, B et C (*fig.* 800) du prisme : en effet, en supposant l'angle D droit, et que les rayons incidents entrent et sortent perpendiculairement aux faces CD et AD, il est évident que l'angle $a = 45°$: alors l'angle de réflexion au point o, compté de la surface, est de 22° 30′, et par suite l'angle $A = 90° - 22° 30' = 67° 30'$, et l'angle $B = 180° - 45° = 135°$. On voit que pour le verre les réflexions seront totales : car l'angle limite pour le verre ordinaire est de 41° 48′ à compter de la normale, et de 48° 12′ à partir de la surface.

Pour que cet instrument soit d'un usage commode, il faut ajouter à l'appareil simple que nous venons de décrire plusieurs dispositions indispensables :

1° Le papier et la pointe du crayon étant supposés placés à la distance de la vue distincte, l'œil ne peut pas voir en même temps avec netteté les images des objets extérieurs et la pointe du crayon, quoique la pupille soit convenablement placée ; pour éviter cet inconvénient, on place devant la face DC du prisme une lentille convergente, qui donne aux faisceaux réfléchis la même divergence que les faisceaux qui sont reçus directement.

2° La différence d'éclat de l'image réfléchie et du papier peut empêcher la vision distincte de l'un ou l'autre ; c'est pourquoi il est nécessaire d'adapter au prisme un ou plusieurs verres colorés, que l'on tourne ou du côté des objets, ou du côté du papier, pour en diminuer l'éclat.

3° Pour maintenir l'œil dans une position convenable, on adapte à la partie supérieure du prisme une lame de cuivre percée d'une petite ouverture, que l'on place d'une manière convenable et à travers laquelle on regarde.

La chambre claire de M. Wollaston a été perfectionnée par Amici et par M. C. Chevalier. Nous renvoyons le lecteur, pour tous les détails de construction et pour les usages de cet appareil, à une petite brochure publiée en 1829 par M. C. Chevalier ; nous rapporterons seulement le principe sur lequel ces perfectionnements sont fondés. Dans la disposition de Wollaston, un très-petit mouvement de l'œil fait varier très-rapidement l'intensité de la lumière de l'image ou du crayon ; si l'œil s'avance un peu vers le prisme, l'image devient très-nette ; mais on n'aperçoit plus le crayon : un mouvement contraire produit l'effet inverse. C'est pour obvier à cet inconvénient que M. Amici a imaginé de disposer l'appareil d'une manière différente. AB (*fig.* 801) est une lame de verre à faces parallèles, CDE est un prisme de verre fixé à la lame ; les rayons qui arrivent dans le prisme perpendiculairement à la face CE se réfléchissent en totalité sur DE, ressortent perpendiculairement à DC, se réfléchissent de nouveau sur la face supérieure de la lame AB, et arrivent à l'œil, qui aperçoit en même temps le papier à travers la lame AB.

1312. *Héliostat.* Cet instrument a pour objet, comme son nom l'indique, de donner à un rayon réfléchi qui pénètre dans une chambre obscure une direction constante. Si la direction du rayon réfléchi était parallèle à celle de l'axe de la terre, le miroir devrait décrire une surface conique droite autour de cet axe, dont l'angle au sommet varierait avec la déclinaison du soleil. En effet, le rayon de la terre pouvant être négligé par rapport à la distance du soleil ainsi que les variations de déclinaison pendant un jour, la courbe apparente décrite par le soleil est un cercle, et les rayons

Digitized by Google

incidents sur le miroir forment une surface conique droite autour d'une ligne parallèle à l'axe de la terre ; et par conséquent les rayons réfléchis auraient la direction de cet axe, si la normale au miroir décrivait uniformément et en un jour une surface conique droite, ayant pour angle au sommet la moitié du complément de la déclinaison du soleil (*fig.* 802). Ce mouvement s'obtiendrait facilement à l'aide d'une horloge qui ferait mouvoir une aiguille autour d'un cadran parallèle à l'équateur : le miroir serait mobile autour d'une pointe placée dans l'axe du cadran, et serait fixé à une tige perpendiculaire à son plan que l'aiguille entraînerait dans son mouvement. Si la direction du rayon réfléchi devait être différente, et c'est ce qui arrive toujours, car pour la plupart des expériences il doit être horizontal, on pourrait employer le même appareil, et donner au rayon la direction convenable en le faisant réfléchir sur un second miroir fixe ; mais il y aurait beaucoup de lumière perdue par ces deux réflexions. On emploie ordinairement l'appareil que nous allons décrire, au moyen duquel on donne au rayon réfléchi une direction quelconque par une seule réflexion. Cet appareil est dû à Sgrawsande.

Soient PP' (*fig.* 803) l'axe de rotation diurne apparent du soleil, C un point de la surface de la terre, CM la direction constante que doit prendre le rayon réfléchi ; le miroir est dirigé par une tige perpendiculaire à son plan, dont il faut déterminer la position à chaque instant, de manière que le rayon réfléchi ait la direction donnée. Pour cela supposons que le plan de la figure soit celui du méridien qui renferme CM ; prolongeons CM d'une quantité quelconque CA, que nous désignerons par a, et prenons sur le prolongement de SC une longueur $CB = a$: si on joint les points A et B, la droite CK, qui passe par le point K milieu de AB, sera la position de la queue du miroir quand le soleil sera en S ; pour avoir les positions du point K pour les autres positions du soleil, il faut prolonger les rayons au-dessous du point C d'une quantité égale à a, joindre les extrémités de ces prolongements avec le point A, et prendre le milieu de chacune de ces droites. Mais, si par le point B on mène un plan perpendiculaire à CP', ce plan coupera la seconde nappe du cône SCS' suivant un cercle BB', qui sera le lieu des extrémités des rayons solaires prolongés au-dessous du point C d'une quantité a : alors le lieu des lignes par le milieu desquelles passe la queue du miroir sera le cône oblique ABB', et les milieux des arêtes étant un cercle parallèle à BB', il s'ensuit que la queue du miroir décrit un cône oblique à base circulaire parallèle à l'équateur. L'arête CB' de la seconde nappe du cône des rayons incidents étant égale à a, le rayon du cercle BB' est égale à $a \cos d$, d étant la déclinaison du soleil : par conséquent, en désignant par R le rayon du cercle KK', on a

$$R = \frac{1}{2} a \cos d.$$

Menons par le point O', centre du cercle KK', la ligne $O'E$ parallèle à PP', cette droite rencontrera AC en un point E, milieu de AC ; et, si par le point E on mène la ligne EK, cette ligne sera évidemment parallèle à CB : par conséquent, si la ligne EO' était une tige métallique, l'ombre qu'elle porterait sur le plan du cercle KK' passerait par le point de rencontre de la queue du miroir avec ce plan. Il résulte de là que, si le mouvement de la queue du miroir est dirigé par un rayon du cercle KK', ce rayon devra se mouvoir de manière à se trouver dans l'ombre projetée par le style EO' : le rayon devra donc se mouvoir comme l'ombre du style d'un quadran équatorial, c'est-à-dire indiquer l'heure vraie à chaque instant. En désignant par l la longueur du style $O'E$, on a évidemment $l = R \tang d$.

Il est maintenant facile de comprendre la disposition de l'héliostat et la manière de s'en servir.

L'héliostat se compose 1° d'un miroir métallique mn (*fig.* 804), qui peut prendre autour du point C toutes les positions possibles ; il est garni d'une tige CK' qui sert à le diriger ; 2° d'une horloge dont le cadran est incliné à l'horizon d'un angle égal à la latitude du lieu, et dont la ligne de midi est dirigée suivant la ligne de plus grande pente. On commence par

Digitized by Google

orienter le cadran, c'est-à-dire on le place parallèlement à l'équateur; ensuite on donne au style $O'E$ la longueur R tang d : alors on fixe la position du centre du miroir et on substitue au miroir et à son support une tige verticale portant à la hauteur du point C une tige métallique, à laquelle on peut donner une direction et une longueur quelconques. Le rayon R de l'aiguille étant fixé, on a

$$a = 2R : \cos d, \text{ et } CE = a/2 = R : \cos d.$$

On donne alors à la tige la longueur $a/2$ et la direction du rayon réfléchi. L'extrémité de cette tige devant aboutir à l'extrémité du style, on fait mouvoir l'horloge parallèlement à elle-même jusqu'à ce que cette condition soit remplie; on substitue le miroir au positeur, on met l'horloge à l'heure, et on engage la queue du miroir dans un anneau à deux mouvements rectangulaires, fixé à l'extrémitié de l'aiguille.

Dans cette méthode, le mouvement qu'on est obligé de donner à l'horloge pour amener l'extrémité du style en contact avec l'extrémité du positeur est difficile à exécuter, à cause de la condition de laisser le plan du cadran parallèle à l'équateur. Charles, par une modification très-ingénieuse, est parvenu à simplifier beaucoup l'établissement journalier de l'héliostat.

Pour comprendre la modification dont il s'agit, supposons que kk' (*fig.* 805) soit le cadran orienté, $O''T$ une ligne horizontale dirigée dans le méridien; si on suppose que l'horloge soit fixée d'une manière invariable, que le pied du miroir soit lié au pied de l'horloge, mais de manière qu'il puisse tourner autour de la verticale EE', qui passe par l'extrémité du stylet, et de plus que les longueurs $O''E'$, $E'C'$, CC', puissent varier à volonté, je dis qu'en déterminant pour chaque jour les longueurs $O''E'$, $E'C'$ et CC', et en faisant tourner d'un angle convenable le pied du miroir autour de EE', on parviendra à obtenir le rayon réfléchi dans une direction donnée, sans avoir besoin ni du positeur, ni de faire varier la longueur de l'axe EO' du cadran. En effet, il est d'abord évident que, si la direction du rayon réfléchi était située dans le méridien, le plan $EE'CC'$ coïnciderait avec le plan $EE'O'O''$; mais, en faisant tourner le premier plan autour de EE', l'extrémité du style resterait toujours en contact avec l'extrémité du positeur : par conséquent la direction du rayon réfléchi changerait en conservant la même inclinaison à l'horizon; ainsi le problème général se trouve ramené au cas où le rayon réfléchi est situé dans le méridien.

Dans ce cas (*fig.* 806), en désignant par i l'inclinaison du rayon réfléchi sur l'horizon, et par Λ la latitude du lieu, on a évidemment

$$O''E' = R \text{ tang } d \cos \Lambda,$$

$$C'E' = \frac{a}{2} \cos i = \frac{R \cos i}{\cos d},$$

$$CM = \frac{a}{2} \sin i + EO' \sin \Lambda = \frac{R \sin i}{\cos d} + R \text{ tang } d \sin \Lambda.$$

Si le rayon était horizontal, ce qui est la position la plus commode, on aurait $\sin i = 0$, et par suite $O''E' = R$ tang d cos Λ, $C'E' = \frac{R}{\cos d}$, $CM = R$ tang d sin Λ.

Comme les positions des zéros des échelles sont arbitraires, on les place ordinairement dans les points qui correspondent aux équinoxes; mais pour ce cas particulier $d = 0$, et par conséquent $O''E' = 0$, $C'E' = R$ et $CM = 0$: ainsi le zéro de la division sur laquelle on compte la distance $O''E'$ correspond à la projection du centre de rotation de l'aiguille, le zéro de l'échelle relative à la distance CM est à la hauteur du centre de rotation de l'aiguille, et enfin le zéro de l'échelle relative à la distance $C'E'$ est à une distance R de la verticale du centre du miroir; alors il faut prendre sur cette dernière échelle, à compter du zéro, une distance égale à $\frac{R}{\cos d} - R$. La *fig.* 807 représente la disposition de l'appareil; il est important de remarquer que le centre de rotation de l'aiguille est au point O' correspondant au point k, par lequel passe la queue du miroir dans toutes ses positions.

Digitized by Google

M. Gambey a imaginé un héliostat d'un usage beaucoup plus commode, et qui n'exige aucun calcul. Voici le principe sur lequel il repose. Soit *MN* (*fig.* 807 *A*) une roue dentée parallèle à l'équateur, qu'une horloge fait tourner uniformément autour du cylindre fixe *PP'*, perpendiculaire à son plan, de manière que la rotation s'effectue dans un jour; soit *PR* une tige entraînée par le cercle mobile, en faisant avec *MN* un angle égal à la déclinaison du soleil : cette tige dans son mouvement restera toujours parallèle aux rayons solaires; soit *mn* un miroir mobile autour de la droite *OP* et d'une ligne tracée dans son plan perpendiculairement à *OP*; la tige *PR*, à une distance $PK = Po$, porte une douille à deux mouvements rectangulaires, dans laquelle s'engage une tige *np* fixée au miroir dans son plan, et perpendiculairement au second axe de rotation. Il résulte de cette disposition que le cercle *MN* en tournant entraîne *PK* ainsi que la tige *np* du miroir; et que, dans toutes les positions, les rayons incidents étant parallèles à *PR*, le plan du miroir étant toujours perpendiculaire au plan du triangle *oPK*, et *Po* étant égal à *PK*, les angles *a* et *b* sont égaux, et le rayon réfléchi a la direction constante *Po*, qui est d'ailleurs arbitraire. On voit d'après cela que l'établissement de l'héliostat consiste uniquement à placer *MN* parallèlement à l'équateur, à faire l'angle *P'PK* égal au complément de la déclinaison du soleil, et à donner à *Po* la direction du rayon réfléchi.

1313. *Miroirs courbes.* Les miroirs concaves sont quelquefois employés pour produire une très-haute température à leur foyer, en les exposant aux rayons solaires. Les miroirs sphériques conviennent peu à cet usage, parce que tous les rayons réfléchis ne passent pas rigoureusement par le foyer; les miroirs paraboliques sont bien préférables. Avec un miroir parabolique construit pour cet objet par M. Villèle, de Lyon, en alliage de cuivre et d'étain, et qui avait $1^{m},50$ de diamètre et $90^{mm},095$ de distance focale, on fondit un sou en 16 secondes. Le père Kircher imagina le premier de substituer aux miroirs courbes un système de miroirs plans, disposés de manière à réunir en un même point et à une distance variable tous les rayons réfléchis. Plus tard, Buffon fit construire un appareil composé de 154 miroirs, avec lequel il enflamma des planches goudronnées à 50 mètres, et du sapin soufré à 83 mètres; avec un autre appareil composé de 224 miroirs il mit de l'argent en fusion à 13 mètres de distance. Il est très-probable d'après cela que c'est par une combinaison de miroirs plans qu'Archimède parvint à brûler la flotte de Marcellus. On emploie fréquemment les miroirs courbes pour diriger la lumière des appareils d'éclairage dans l'espace qui doit être éclairé, et les miroirs paraboliques pour porter la lumière de leur foyer à une grande distance : les rayons réfléchis, étant sensiblement parallèles, franchissent une très-grande distance sans éprouver une grande diminution d'intensité. Cette disposition était autrefois employée dans les phares; mais on a remplacé les miroirs par des lentilles qui produisent beaucoup plus d'effet, comme nous le verrons plus loin.

1314. Nous avons déjà parlé des images qui se forment dans l'espace par la réflexion des miroirs courbes; nous avons vu qu'elles sont le lieu des foyers de tous les points de l'objet lumineux : elles ne sont visibles dans toutes les directions que quand on les reçoit sur un corps opaque, tel que du papier, de la poussière, de la fumée, etc. Les images que l'on voit dans les miroirs courbes, concaves ou convexes, sont aux points de concours des différents faisceaux de rayons qui sont reçus par l'œil. Si tous les rayons partis d'un même point de l'objet se réunissaient rigoureusement en un même point, l'image que l'on aperçoit serait exactement le lieu des foyers des points éclairants, et par conséquent elle coïnciderait avec l'image qui se forme dans l'espace. Mais nous avons vu qu'il n'en est pas ainsi, et que les rayons réfléchis par une surface quelconque se coupent sur deux surfaces conjuguées, que nous avons désignées sous le nom de *caustiques* : par conséquent, c'est sur ces surfaces que seront les

Digitized by Google

images du point lumineux. De là il est facile de conclure que, si par le centre de la pupille on mène une droite tangente aux deux surfaces caustiques, on aura le rayon qui forme l'axe du faisceau réfléchi qui revient à l'œil; les autres rayons en seront très-rapprochés, et se couperont sensiblement aux points de tangence du premier avec les deux surfaces. Si ces deux points sont placés de côtés différents par rapport à l'œil, l'image du point lumineux sera vue dans celui de ces points qui est en avant de l'œil; mais si les points de tangence sont tous deux en avant de l'œil, la distance apparente devra être une combinaison des distances de ces deux points à l'œil. Nous admettrons avec Newton que le lieu de l'image partage en deux parties égales l'intervalle compris entre les deux points où l'axe commun des deux faisceaux touche les deux surfaces.

Il résulte de ce qui précède que les images que l'on voit dans les miroirs courbes diffèrent des images qui seraient le lieu des foyers de chacun des points lumineux; mais en général elles en diffèrent peu, et on peut presque toujours les confondre sans erreur sensible, du moins quand les surfaces des miroirs n'ont qu'une petite étendue relativement à celle de la surface de la sphère du même rayon. Ainsi, pour reconnaître les grandeurs, les formes et les positions des images dans les différentes positions de l'objet, il suffira d'examiner dans les différents cas les positions des foyers.

1315. Considérons d'abord un miroir concave, et supposons que l'objet soit placé entre le miroir et le foyer principal (*fig.* 808) : il est facile de voir que l'image sera virtuelle, droite et plus grande que l'objet, d'autant plus que l'objet sera plus près du foyer principal. Si l'objet (*fig.* 809) est placé entre le foyer principal et le centre, l'image sera renversée et placée au delà du centre, et d'autant plus grande et plus éloignée que l'objet sera plus près du foyer principal. Si l'objet était placé au delà du centre (*fig.* 810), l'image serait renversée et placée entre le centre et le foyer principal. Quant aux images produites dans les miroirs convexes, il est facile de voir qu'elles seront toujours droites et plus petites que l'objet (*fig.* 811).

En désignant par O la grandeur de l'objet, par O' celle de l'image, par a la moitié du rayon du miroir, par p les distances des extrémités de l'objet au miroir comptées sur les diamètres, et par p', celles des extrémités de l'image, on a évidemment

Dans le 1er cas (*fig.* 808),	$O : O' :: 2a - p : 2a + p'$.
Dans le 2e cas (*fig.* 809),	$O : O' :: 2a - p : p' - 2a$.
Dans le 3e cas (*fig.* 810),	$O : O' :: p - 2a : 2a - p'$.
Dans le 4e cas (*fig.* 811),	$O : O' :: 2a + p : 2a - p'$.

1316. Lorsqu'on se regarde dans un miroir courbe, les apparences varient suivant la distance à laquelle on se trouve du miroir; ce qui précède les explique facilement. A une distance du miroir plus petite que la distance focale principale, l'image est droite, et grossit à mesure qu'on s'éloigne; elle disparaît lorsqu'on arrive au foyer principal, et ne reparaît que quand on a dépassé le centre, attendu qu'entre le foyer principal et le centre, les foyers étant au delà du centre, l'œil ne reçoit que des faisceaux convergents qui ne peuvent pas produire d'images; au delà du centre, l'image reparaît, mais renversée et d'autant plus petite qu'on s'éloigne davantage.

1317. Les miroirs qui ne sont pas plans déforment toujours les objets. Cette déformation est peu sensible dans les miroirs sphériques, qui n'occupent qu'un petit nombre de degrés; mais dans les miroirs cylindriques ou coniques la déformation est très-grande, et par conséquent, des dessins d'une forme très-irrégulière peuvent produire des images régulières qui paraissent n'avoir aucun rapport avec les dessins.

Digitized by Google

1318. *Lentilles.* Les lentilles sont employées pour produire à leur foyer une haute température par la concentration des rayons solaires. Si tous les rayons convergeaient exactement au même point, l'effet d'une lentille serait proportionnel à son étendue; mais l'aberration de sphéricité le diminue beaucoup. La plus forte lentille combustible qui ait été construite est celle de Parker; elle était en flint-glass, de 914 millimètres de diamètre, 82 d'épaisseur au centre, 2051 de distance focale; l'image solaire au foyer avait 23 millimètres; les rayons réfractés étaient reçus sur une seconde lentille de 330 millimètres de diamètre, de 41 millimètres d'épaisseur et de 737 millimètres de foyer : le diamètre de l'image solaire était réduit à 13 millimètres, et on parvint à fondre au foyer l'or, le platine, le quartz, etc. La difficulté d'obtenir de grandes masses de verre assez pur, et de construire ces grandes lentilles, avait fait proposer par Buffon de construire les lentilles avec des bandes annulaires concentriques (*fig.* 812) formées chacune de plusieurs pièces. On pourrait alors calculer la courbure des pièces annulaires de manière que les rayons réfractés passassent exactement par le même point. Les lentilles ainsi construites seraient bien préférables aux lentilles d'une seule pièce et d'une seule courbure.

1319. Les lentilles sont aussi employées pour concentrer la lumière à leur foyer, et éclairer fortement les objets qui s'y trouvent placés : nous en verrons bientôt plusieurs exemples. Certains ouvriers se servent de boules de verre pleines d'eau pour concentrer la lumière sur une petite étendue.

1320. Les lentilles sont aussi en usage pour porter la lumière à une grande distance, en plaçant le foyer de lumière au foyer principal de la lentille; mais pour cet objet les lentilles à échelons sont bien préférables aux lentilles ordinaires. Fresnel a fait construire des phares avec des lentilles à échelons qui portent la lumière à une distance beaucoup plus grande que les anciens phares à miroirs : aussi, depuis, ces derniers ont été remplacés par des phares à lentilles. Les phares construits par Fresnel consistent en huit grands verres lenticulaires carrés, formant par leur réunion un prisme octogone dont le centre coïncide avec le foyer commun des lentilles; en ce point est placée la lumière unique qui éclaire le phare; elle est produite par un bec de lampe à trois mèches concentriques, dans lequel un excès d'huile est injecté constamment par une pompe, et qui équivaut à 17 lampes de Carcel pour la lumière et l'huile consommée; les rayons émanés de ce foyer sont rendus parallèles par les lentilles, et se propagent à une grande distance. L'appareil tourne uniformément sur lui-même : alors les faisceaux atteignent successivement un même point de l'horizon à des instants également éloignés les uns des autres; le nombre des éclipses qui se produisent dans le même temps est variable d'un phare à un autre, et sert à les faire reconnaître par les navigateurs. La lumière de ces phares est visible à une distance de 16000 toises. Avec une lampe quadruple, MM. Arago et Mathieu l'ont aperçue de jour, avec une lunette, à une distance de 17 lieues; une heure après le coucher du soleil on l'apercevait à l'œil nu. Le phare d'Agde a été vu du mont Béarn, près de Port-Vendres, à une distance de 23 lieues de poste; sur les montagnes il doit être aperçu quelques lieues plus loin.

1321. *Microscopes simples.* Les microscopes simples sont des lentilles divergentes d'un court foyer, qui servent à examiner les objets de très-petites dimensions, en augmentant beaucoup leur diamètre apparent. Pour comprendre l'effet de ces lentilles il faut se souvenir que de petits objets ne peuvent être vus avec netteté qu'autant qu'ils sont placés à une distance de l'œil égale à la distance de la vision distincte, et que, si par un moyen quelconque on parvenait à les voir distinctement beaucoup plus près de l'œil; leur diamètre apparent augmenterait à mesure que leur distance à l'œil diminuerait; et, comme en même temps la quantité de lumière qu'ils

Digitized by Google

enverraient à la pupille augmenterait dans le même rapport que le grossissement, leurs images, quoique grossies, seraient toujours également éclairées. Or, il est facile de voir que cette condition peut toujours être remplie par une lentille convergente placée entre l'œil et l'objet, de manière que l'objet soit en avant de la lentille d'une quantité un peu plus petite que sa distance focale principale : car alors les rayons en la traversant deviendront moins divergents, et la lentille pourra toujours être placée de manière que les rayons émergents, prolongés, forment leurs foyers à la distance de la vue distincte, et par conséquent l'objet sera vu à cette distance, sous un diamètre apparent d'autant plus grand que l'objet sera plus près de l'œil (*fig.* 813). En négligeant la distance de l'œil à la lentille, ainsi que la distance de l'objet au foyer principal de la lentille, le grossissement sera mesuré par le rapport de la distance de la vision distincte à la distance focale principale de la lentille : car l'image *ab* est vue à travers la lentille sous l'angle *aob*, tandis que, s'il était placé à la distance de la vue distincte, on le verrait sous l'angle *ao'b* : ainsi le grossissement est dans le rapport de *o'f* à *of*, c'est-à-dire dans le rapport de la distance de la vision distincte à la distance focale principale de la lentille. Ainsi, par exemple, en prenant 127 millimètres pour la distance la plus convenable à la vision des petits objets, pour obtenir des grossissements 5, 50, 500, les distances focales des loupes devront être 25^{m}, 4; $2^{mm},5$, et $0^{mm},25$. On voit d'après cela que le grossissement d'une même lentille n'est pas le même pour tous les individus : il est plus grand pour les presbytes que pour les myopes.

1322. On pourrait évidemment produire l'effet des lentilles en plaçant devant l'œil une feuille mince opaque percée d'un très-petit trou. Le faisceau qui pénétrerait dans l'œil, étant très-fin, produirait une image assez nette de l'objet, et elle serait grossie comme avec une lentille ; mais étant peu éclairée, elle serait peu distincte.

1323. Les microscopes simples déforment toujours un peu les objets, à cause de l'aberration de sphéricité. Wollaston a imaginé une disposition très-simple pour la détruire : il forme la lentille (*fig.* 814) de deux autres lentilles planes-convexes, appliquées contre une lame mince métallique percée d'un petit orifice ayant pour diamètre un cinquième de la distance focale ; par cet arrangement les rayons, traversant la lentille à une petite distance du centre, font leurs foyers au même point.

1324. On peut faire de très-bonnes loupes d'un court foyer en mettant une goutte d'eau sur une plaque de verre ou dans un petit trou pratiqué dans une lame de métal, ou en mettant un fragment de verre sur un très-petit trou pratiqué dans une lame mince de platine et fondant le verre à la flamme d'un chalumeau : le verre prend sur chaque face une forme sensiblement sphérique et reste adhérent aux bords de l'orifice.

1325. Il est toujours avantageux de monter les loupes au centre d'un petit miroir métallique concave, dirigé vers l'objet, et dont la distance focale principale est la même que celle de la loupe, afin d'augmenter la lumière de l'objet.

1326. Les meilleurs microscopes simples se font avec des pierres fines, telles que le diamant, le grenat ; ces substances sont préférables au verre à cause de leur homogénéité et de leur grand pouvoir réfringent, qui sous la même courbure donne aux lentilles des distances focales beaucoup plus petites. Jusqu'ici on avait trouvé de grandes difficultés à travailler ces matières ; mais on est parvenu à les vaincre en donnant aux bassins dans lesquels on les travaille une très-grande vitesse de rotation.

1327. On doit à M. Brewster une méthode très-simple pour employer les lentilles planes-convexes, qui donnent le même grossissement qu'une lentille biconvexe de même courbure. Il suffit (*fig.* 815) d'observer les rayons réfléchis sur la surface

Digitized by Google

plane : la convergence des rayons incidents se transmettant aux rayons réfléchis, il est évident que l'effet est le même que si la lentille était biconvexe, et si on observait par transmission.

1328. On peut aussi voir à travers une lentille un objet qui se trouve à une distance de la lentille plus grande que sa distance focale principale : alors l'image (*fig.* 816) se trouve renversée et de l'autre côté de la lentille, et l'œil devra évidemment se trouver au delà sur l'axe de la lentille et à une distance égale à la distance de la vision distincte. Il est facile de voir que l'image sera d'autant plus grande que l'objet sera plus près du foyer principal de la lentille, et qu'en désignant par p et p' les distances de l'objet et de son image à la lentille, le grossissement sera dans le rapport de $\frac{p'}{p}$.

Quant aux lentilles divergentes, l'image sera toujours plus petite que l'objet, et située du même côté de la lentille (*fig.* 817).

1329. *Chambre obscure.* Si on pratique au volet d'une chambre obscure un petit orifice, on verra une image renversée des objets extérieurs sur le mur opposé au volet, et cette image sera d'autant plus nette, mais d'autant moins éclairée, que l'orifice aura un plus petit diamètre. Cet effet provient évidemment de ce que chaque point lumineux éclaire le mur par un faisceau d'un petit diamètre, et que les images de chaque point sont d'autant plus nettes qu'elles sont plus petites. Mais si on pratique dans le volet un grand orifice, et si on y introduit une lentille convergente, en plaçant à son foyer principal un carton ou un verre dépoli, on y verra une image renversée très-nette des objets extérieurs, et si on recevait la lumière sur un miroir, avant ou après son passage à travers la lentille, l'image sur l'écran serait évidemment droite. Cet appareil porte alors le nom de *chambre obscure*. Les chambres obscures varient beaucoup dans leurs formes et leur grandeur suivant l'objet auquel on les destine. Les figures 818 et 819 représentent les dispositions les plus ordinaires. Dans la première on reçoit l'image sur un carton, sur lequel on peut facilement en tracer les contours. *ab* est un miroir sur lequel les rayons viennent d'abord se réfléchir avant de traverser la lentille *cd;* on fait varier l'inclinaison du miroir au moyen de la tige *pq; ABCD* est une caisse en bois noircie intérieurement, au fond de laquelle se trouve le carton sur lequel l'image vient se peindre; elle est percée latéralement d'une ouverture *mn,* par laquelle l'observateur introduit la partie supérieure de son corps; au-dessus du point *m* se trouve un rideau que l'observateur fait passer derrière lui pour intercepter la lumière étrangère qui troublerait la netteté des images. Le tuyau qui porte la lentille est mobile, afin que l'on puisse la placer à la hauteur convenable pour que le foyer soit sur *BC*. Quelquefois la partie latérale de la caisse est remplacée par un rideau qui descend jusqu'à terre et enveloppe complétement une table circulaire qui peut se placer à différentes hauteurs : c'est dans l'intérieur de ce rideau que se place l'observateur. Dans la fig. 819, les rayons, après avoir traversé la lentille *cd,* se réfléchissent sur le miroir *ab,* et l'image se forme sur un verre dépoli *ef; mn* est une petite planche garnie latéralement de joues, que l'observateur élève à la hauteur convenable, et qui est destinée à empêcher la lumière étrangère d'arriver sur le verre dépoli.

L'appareil que nous venons de décrire renferme une grave imperfection : si on fait varier la distance de la lentille à l'écran de manière que l'image soit très-nette au centre, elle ne l'est plus sur les bords, et réciproquement. Cela tient évidemment à ce que, les distances focales des rayons qui traversent obliquement la lentille étant d'autant plus petites que les rayons sont plus obliques, l'écran n'est pas placé au foyer de tous les systèmes de rayons; l'effet serait encore évidemment le même si les

Digitized by Google

distances focales étaient indépendantes de l'inclinaison des rayons. Wollaston a évité cet inconvénient en employant une lentille concave-convexe, dont la concavité est tournée du côté du miroir (*fig.* 818) : car dans ces espèces de lentilles les distances focales croissent avec l'inclinaison des rayons. On conçoit alors qu'on peut par tâtonnement trouver le rapport des courbures des deux surfaces de manière que les foyers se fassent tous sensiblement sur l'écran, du moins dans une certaine limite d'inclinaison. Wollaston avait donné d'abord pour le rapport le plus convenable des courbures des deux verres celui de 2 à 1 ; mais, depuis, M. Cauchois a trouvé que le rapport le plus avantageux était celui de 8 à 3.

La chambre obscure ainsi perfectionnée par Wollaston avait encore un inconvénient : si on employait pour miroir une glace étamée, on avait plusieurs réflexions qui altéraient la netteté de l'image : si on employait des miroirs métalliques, on obtenait moins de lumière, et ces miroirs exposés à l'air s'altéraient facilement. M. C. Chevalier, opticien, a obvié à cet inconvénient en remplaçant la lentille et le miroir par un prisme de verre (*fig.* 820) dont les faces *AC* et *CB* sont l'une convexe, l'autre concave : la lumière qui pénètre dans le prisme éprouve une réflexion totale sur la face *AB*, et elle reçoit à son entrée et à sa sortie le même degré de convergence que si elle traversait une lentille ayant les courbures des faces *AC* et *BC* du prisme. Le prisme est placé dans une boîte en cuivre, noircie intérieurement et garnie d'une fenêtre, de manière qu'on puisse lui donner le degré convenable d'inclinaison, et la boîte est placée sur un disque de bois soutenu par trois pieds ; une étoffe noire, fixée supérieurement dans la gorge du disque de bois et descendant jusqu'à terre, forme une enveloppe dans laquelle se place l'observateur.

1330. *Mégascope.* Si on place dans le volet d'une chambre obscure une lentille convergente (*fig.* 821), et devant la lentille, à une distance plus grande que sa distance focale principale, un objet éclairé par des rayons solaires directs ou réfléchis, il se formera dans la chambre une image renversée que l'on pourra recevoir sur un écran et dont la grandeur dépendra de la distance de l'objet à la lentille et de la distance focale de la lentille, et en renversant l'objet lui-même il est évident que l'image sera droite. En employant une lentille achromatique et un grossissement de 2 à 20, on obtient des images très-nettes : cet instrument peut alors être utile dans les recherches de physique et d'histoire naturelle ; c'est à Charles qu'on le doit.

1331. *Lanterne magique.* La lanterne magique est fondée sur le même principe que le mégascope. Des objets peints sur une lame de verre sont fortement éclairés par une lampe dont la lumière est réfléchie par un miroir, et concentrée par une grande lentille à foyer très-court ; au delà de la lame de verre, et à une distance plus grande que sa distance focale principale, se trouve une lentille convergente qui va former sur un tableau une image amplifiée et renversée des objets peints sur la lame de verre ; les images sont évidemment droites quand les objets peints sur la lame de verre sont renversés.

1332. *Fantasmagorie.* La fantasmagorie n'est autre chose qu'une lanterne magique dont on fait varier la distance de l'objet au verre convergent, et de l'appareil au tableau : on obtient alors des images dont la grandeur varie entre des limites très-étendues et qui paraissent s'approcher ou s'éloigner. Les images se forment sur une grande toile tendue dans un cadre ; d'un côté se trouvent les spectateurs, de l'autre la lanterne magique, montée sur un chariot, que l'on éloigne ou qu'on rapproche successivement du tableau en faisant varier en même temps la distance de l'objet à la lentille de manière que cette distance soit à celle du tableau dans le rapport des distances des foyers conjugués ; et comme il est important pour l'illusion que la lumière de l'image éprouve les mêmes variations que sa grandeur, on place dans l'intérieur

Digitized by Google

de la lanterne un diaphragme mobile qui rétrécit le faisceau de lumière qui éclaire l'objet à mesure que l'image devient plus petite.

1333. *Microscope solaire.* Cet instrument ne diffère du mégascope qu'en ce qu'il est destiné à observer des objets de très-petites dimensions. Il est formé d'un miroir *mn* (*fig.* 822) auquel on peut donner une direction déterminée à l'aide de deux mouvements rectangulaires, et d'un tuyau renfermant deux lentilles *A* et *B* : l'une est destinée à concentrer les rayons solaires sur deux lames de verre *p*, *q*, renfermant entre elles les petits objets dont on veut avoir une image amplifiée; l'autre, placée à une distance de *pq* plus petite que la distance focale principale, a pour objet de produire une image grossie *ab'* des objets placés entre les deux lames de verre.

1334. On a imaginé récemment de substituer aux rayons solaires la lumière qui se dégage d'un morceau de carbonate de chaux sur lequel on dirige un jet d'hydrogène et d'oxygène dans les proportions nécessaires pour faire de l'eau : la chaux réduite prend un éclat extraordinaire et projette sur l'objet à l'aide d'une lentille une lumière si vive qu'on peut obtenir un grossissement considérable avec une grande netteté dans l'image. On obtient aussi une lumière très-brillante par le procédé suivant : on trempe une bande de papier blanc dans une dissolution d'hydro-chlorate de chaux, on l'essuie légèrement et on la plonge dans une flamme d'alcool : bientôt il ne reste qu'un réseau de sel qui jette une vive lumière, incomparablement plus grande que celle de l'alcool.

1335. Les instruments que nous allons décrire, le microscope composé et les lunettes, sont formés de deux lentilles ou de deux systèmes de lentilles : l'un porte le nom d'*objectif*, l'autre celui d'*oculaire*. Le premier reçoit les rayons de l'objet et forme derrière lui une image que l'on regarde avec une ou plusieurs loupes qui constituent l'oculaire. Ces lentilles doivent toujours être placées sur le même axe, solidement assujetties dans un tuyau formé de plusieurs pièces qui peuvent glisser les unes dans les autres, afin de faire varier la distance de l'oculaire à l'objectif; ce tuyau est noirci intérieurement, afin d'absorber les rayons obliques qui viennent frapper sa surface; on place même dans l'intérieur du tuyau des diaphragmes circulaires noircis pour arrêter les rayons qui sont trop inclinés sur l'axe.

1336. *Microscope composé.* Cet appareil se compose (*fig.* 823) d'une petite lentille *A*, d'un très-court foyer, au devant de laquelle on place un très-petit objet *mn*, à une distance *Ad* plus grande que la distance focale principale *Aa* : il se forme derrière la lentille une image renversée et amplifiée *m'n'*, que l'on regarde avec l'oculaire *B*, placé de manière que la distance *Bd'* soit un peu plus petite que la distance focale principale *Bb*; on aperçoit alors une image *m''n''* beaucoup plus grande; mais pour que cette image soit nette, il faut qu'elle soit à la distance de la vue distincte : on satisfait à cette condition en faisant varier la distance de l'oculaire à l'objectif. Il est facile de voir que dans ces instruments le grossissement total est égal au produit du grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire, et, toutes choses égales d'ailleurs, le grossissement varie avec la distance de la vue distincte de l'observateur.

1337. L'instrument que nous venons de décrire renferme une imperfection intolérable, d'autant plus grande que le grossissement est plus considérable; c'est le défaut d'achromatisme des verres, car il en résulte que l'image *m'n'* et par suite l'image *m''n''* sont garnies de franges irisées qui rendent les contours des objets très-confus. On est parvenu à faire disparaître cet inconvénient par une lentille intermédiaire. Pour comprendre comment cette lentille intermédiaire peut établir l'achromatisme, il faut remarquer que les images de différentes couleurs qui se forment derrière une lentille sont parallèles, à différentes distances et d'inégales largeurs, et que les franges

Digitized by Google

ont pour largeur la différence du diamètre apparent des plus grandes et des plus petites : d'où il suit que, si on pouvait les apercevoir sous le même angle, elles se superposeraient, et les franges disparaîtraient complétement. Pour faire voir que cette dernière circonstance peut être réalisée par une lentille placée entre l'objectif et l'oculaire, considérons un objet *mn* (*fig.* 824) éclairant une lentille *ab* : les rayons de différentes couleurs iront former des images *vv*, *rr*, et les plus éloignées appartiendront aux rayons rouges. Supposons maintenant que les rayons soient reçus sur une seconde lentille *a'b'* placée en avant des images colorées : les rayons iront se réunir sur les lignes *o'v*, *o'r*, en des points *v'*, *r'*, et les points *v'v'* seront plus rapprochés de la lentille *a'b'* que les autres ; alors si le centre de la dernière lentille est sur la ligne *v' r'*, il est évident que les franges disparaîtront complétement. On peut placer la nouvelle lentille au delà de l'image formée par l'objectif ; l'effet produit est le même, comme on peut s'en assurer à l'inspection de la figure 825. Cette disposition est plus avantageuse que la première quand l'instrument renferme un micromètre placé au lieu de l'image de l'objectif, parce qu'alors le micromètre peut être fixé, tandis que dans la première disposition il devrait se mouvoir avec le dernier oculaire et pourrait éprouver des dérangements.

Dans les microscopes, la lentille intermédiaire a encore pour objet de rassembler les rayons trop obliques qui ne tomberaient pas sur l'oculaire, et par suite d'augmenter l'éclat de l'image et l'étendue du champ.

1338. Les microscopes sont généralement disposés comme l'indique la fig. 826. Le tuyau supérieur *GE* porte le système des oculaires ; il peut glisser à frottement dans le tuyau *FC*, et celui-ci dans le tuyau *BA*, dont l'extrémité inférieure porte l'objectif ; *DD* est un diaphragme destiné à arrêter les rayons trop obliques, *SS* est le support sur lequel on place l'objet que l'on veut observer. On peut le rapprocher ou l'éloigner de l'oculaire au moyen d'une vis de rappel *X* ; *V* représente un miroir destiné à éclairer fortement l'objet.

Pour chaque système de verre, le grossissement est évidemment d'autant plus grand que l'objet *m n* (*fig.* 823) se rapproche davantage du foyer principal ; mais il y a une limite de distance qui ne peut pas être dépassée : car il ne faut pas que l'image *m'n'* soit au delà des oculaires. En faisant varier les dimensions des verres, le grossissement croît à mesure que l'objectif et l'oculaire ont un foyer plus court ; mais ce grossissement ne peut pas non plus augmenter indéfiniment, 1° parce que, l'objectif étant déjà d'une très-petite dimension, il est impossible de diminuer indéfiniment son rayon ; 2° parce que, l'objectif diminuant de rayon de courbure, les rayons incidents deviennent trop obliques et les images sont déformées, ou bien il faut n'admettre qu'un faisceau de rayons trop petit pour éclairer suffisamment l'image *m'n'* ; 3° parce que l'oculaire ne peut pas non plus diminuer d'étendue sans laisser échapper un grand nombre de rayons.

1339. On peut à l'aide du microscope mesurer les dimensions absolues des corps : on y parvient facilement en plaçant l'objet sur une lame de verre divisée par des lignes parallèles très-rapprochées, à des distances égales et connues les unes des autres, appareil qu'on désigne sous le nom de *micromètre*, et on observe au microscope combien l'objet couvre de ces divisions. Mais si l'objet a une certaine épaisseur, il est impossible de voir distinctement et l'objet et le micromètre ; alors, pour remédier à cet inconvénient, on place un autre micromètre sur un diaphragme qui répond à l'image donnée par l'objectif ; on observe combien l'image de l'objet occupe de divisions sur ce micromètre intérieur : ce nombre, divisé par le grossissement de l'objectif, donne la grandeur absolue de l'objet.

Le microscope que nous venons de décrire, malgré l'achromatisme produit par le

Digitized by Google

verre intermédiaire, donne toujours des franges irisées. Maintenant on substitue à la lentille objective plusieurs lentilles achromatiques superposées, qui produisent le même effet qu'une seule lentille d'un foyer beaucoup plus petit, mais qui, à cause de la petitesse de ses dimensions, ne pourrait pas être achromatisée, et on emploie des oculaires achromatiques (1346).

1340. La fig. 827 représente un microscope achromatique exécuté par M. Vincent Chevalier : *a* est le pied de l'instrument, *b* le système de tubes à tirage portant les verres; à la partie supérieure se trouve un oculaire achromatique, et à la partie inférieure un système d'objectifs achromatiques; *c* est un prisme terminé par deux faces convexes et une face plane; il sert à réfléchir et à concentrer la lumière sur l'objet.

1341. M. Amici, de Modène, a fait au microscope achromatique plusieurs perfectionnements importants; cet appareil étant bien supérieur à tous les autres, nous donnerons quelques détails sur sa disposition et ses usages.

Le microscope d'Amici est représenté en coupe *fig.* 828, au quart de grandeur naturelle. L'objectif est placé en *A*, l'oculaire en *B*, et en *C* se trouve un prisme de verre qui renvoie le faisceau incident dans l'axe de l'oculaire; l'objectif se compose de trois lentilles achromatiques, dont les distances focales varient de huit à dix millimètres. On peut employer la première seule, ou la première et la seconde, ou toutes les trois, suivant le grossissement qu'on veut obtenir; avec le même objectif on peut aussi faire varier le grossissement en changeant l'oculaire. La partie du tube où l'on place les oculaires est environnée d'un large diaphragme noir qui intercepte toute lumière étrangère, et l'intérieur du tube est tapissé de velours noir qui empêche toute réflexion latérale. Lorsque les objets que l'on veut soumettre à l'expérience sont transparents, on les place dans une goutte d'eau renfermée entre deux lames de verre; on peut aussi placer l'objet à sec sur une lame d'un corps transparent, mais son image est moins nette : dans tous les cas, la lame de verre qui supporte l'objet se place en *DD'*. On éclaire l'objet à l'aide du miroir *MM'*, et, quand on emploie la lumière solaire, on place dans le faisceau réfléchi un verre dépoli; le diaphragme mobile *FG* sert à faire varier le diamètre du faisceau qui éclaire l'objet. Lorsque le corps qu'on observe est opaque, on le place sur un très-petit disque de verre noir collé sur une lame de verre transparent, on l'éclaire en dessus par la lentille *KL* et en dessous par le miroir *MM'*, en plaçant sous l'objectif un petit miroir concave percé. Dans tous les cas, on amène l'objet au foyer en faisant monter ou descendre le porte-objet à l'aide du pignon *P*. Les images sont d'une netteté parfaite lorsque le grossissement est de 300 à 600; au delà, les contours des images deviennent un peu confus.

1342. Le grossissement du microscope peut s'obtenir en multipliant le grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire. Le grossissement de l'oculaire s'obtient en divisant la distance de la vue distincte par la distance du diaphragme, où se forme l'image. Pour trouver le grossissement de l'objectif, on place sur le porte-objet un micromètre tel que celui dont nous venons de parler, on l'éclaire obliquement, et on observe le nombre de divisions qu'on aperçoit à travers le diaphragme, dont la largeur est connue : le rapport entre cette largeur estimée en prenant pour unité l'écartement des traits et le nombre de divisions qu'on aperçoit donne évidemment le grossissement de l'objectif.

1343. Amici a imaginé une méthode très-simple pour déterminer le grossissement des microscopes. Elle consiste à placer en avant de l'oculaire une lame de verre à faces parallèles inclinée de 45° sur l'axe de l'oculaire, et à regarder en même temps par réflexion sur la première surface de la lame l'image d'un objet, et directement à travers la lame une règle divisée : le diamètre de l'objet étant connu, on reconnaîtra

Digitized by Google

combien il occupe de divisions sur la règle, et on en déduira immédiatement le grossissement de l'instrument. Par exemple, si l'objet a 0,1 de millimètre, et si les divisions de la règle sont éloignées les unes des autres de 1 millimètre, l'image couvrant quarante divisions, le grossissement sera 400.

1344. *Détermination des indices de réfraction des liquides au moyen du microscope.* Ce moyen ingénieux est dû au docteur Brewster.

Supposons qu'on ait formé avec deux liquides deux ménisques plans concaves de même courbure : si nous désignons les indices de réfraction des deux liquides par n et n', le rayon de courbure par r, et par f et f' les distances focales principales, nous aurons

$$f = \frac{r}{n-1} \quad \text{et} \quad f' = \frac{r}{n'-1},$$

équations qui donnent

$$\frac{n'-1}{n-1} = \frac{f}{f'} \quad \text{et} \quad n' = 1 + (n-1)\cdot\frac{f}{f'}. \qquad (a)$$

Ainsi, quand on connaîtra l'indice de réfraction d'un des liquides et le rapport des distances focales principales des deux lentilles, on pourra déterminer l'indice de réfraction de l'autre liquide. Pour former des ménisques égaux avec différents liquides, il suffit de les placer entre une lame de verre à faces parallèles et une même lentille. Quant à la détermination des distances focales principales, on y parvient facilement par le procédé suivant.

Imaginons qu'on place successivement les deux liquides entre l'objectif d'un microscope et un verre plan, et qu'on observe successivement les distances d, d', d'', auxquelles un objet doit être placé pour être vu distinctement lorsque l'objectif est nu, et garni du ménisque formé avec l'un et l'autre de ces liquides, l'oculaire restant immobile ; désignons par F, F', F'', les distances focales principales de la lentille objective dans ces trois circonstances, et par m la distance constante à laquelle se forme l'image derrière l'objectif, nous aurons

$$\frac{1}{m} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F}, \quad \frac{1}{m} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{F'} \quad \text{et} \quad \frac{1}{m} + \frac{1}{d''} = \frac{1}{F''}.$$

Mais remarquons que, P' (*fig.* 829) étant le foyer principal de la lentille composée formée de l'objectif et du ménisque du premier liquide, et P le foyer principal de la lentille, si on plaçait au point P' un point lumineux devant le ménisque liquide seul, le point lumineux ferait son foyer conjugué en P : car, si le rayon cb passait dans le verre, il aurait la direction ab ; par conséquent, en passant dans l'air, il aura celle que le rayon ab prendrait en passant du verre dans l'air ; F et F' sont donc des foyers conjugués par rapport au ménisque liquide. Il en sera de même de F et F'' ; et, comme les distances focales principales des ménisques sont représentées par f et f', on aura

$$\frac{1}{F} - \frac{1}{F'} = \frac{1}{f} \quad \text{et} \quad \frac{1}{F} - \frac{1}{F''} = \frac{1}{f'}.$$

Ces équations, combinées avec les précédentes, donnent

$$\frac{1}{f} = \frac{d'-d}{dd'}, \quad \frac{1}{f'} = \frac{d''-d}{dd''},$$

et par conséquent

$$\frac{f}{f'} = \frac{d'-d}{d''-d}\cdot\frac{d''}{d'};$$

Digitized by Google

et, en substituant cette valeur dans l'équation (*a*), il vient

$$n' = 1 + (n - 1).\ \frac{d'' - d}{d' - d} \cdot \frac{d'}{d''}.$$

Ainsi, pour obtenir l'indice de réfraction n', il suffira de déterminer par expérience d, d' et d''.

1345. *Lunette astronomique.* La lunette astronomique la plus simple est composée de deux verres, comme le microscope (*fig.* 823); seulement l'objectif a de plus grandes dimensions et peut être achromatisé; quant aux franges produites par l'oculaire, on peut les faire disparaître aussi en employant un oculaire achromatique. La marche des rayons est représentée dans la fig. 829*A*. Les objets se trouvant très-éloignés, l'image $m'n'$ se fait sensiblement au foyer principal de l'objectif. En supposant que l'objet soit assez éloigné pour que l'on puisse négliger la distance de la vision distincte, par rapport à sa distance de l'œil, les angles visuels de l'objet et de son image sont $m'An'$ et $m''On''$ ou $m'Bn'$, et les tangentes de la moitié de ces angles sont dans le rapport des distances focales principales de l'objectif et de l'oculaire.

1346. *Oculaires achromatiques.* Dans les lunettes astronomiques; ainsi que dans toutes les lunettes à objectifs achromatiques, on est obligé d'employer des oculaires achromatiques. On pourrait les construire, comme les objectifs, de plusieurs lentilles superposées; mais il est beaucoup plus simple de produire l'achromatisme par la combinaison de deux verres de même nature. Cette disposition est analogue à celle qu'on emploie dans les microscopes à objectif simple; mais l'achromatisme ne provient pas de la même cause : car l'achromatisme des images ne se produit dans ces instruments qu'autant que l'objectif lui-même n'est pas complétement achromatique (*fig.* 824 et 825). Dans le cas dont il s'agit, c'est l'aberration de sphéricité des lentilles qui détruit l'aberration de refrangibilité. Pour en concevoir la raison, considérons un rayon de lumière blanche qui pénètre dans la première lentille : les rayons émergents de différentes teintes sont séparés et d'autant plus inclinés sur l'axe qu'ils sont plus réfrangibles; mais alors ils rencontrent la seconde lentille en des points d'autant plus voisins de l'axe, et éprouveront une déviation d'autant plus petite qu'ils seront plus inclinés. On conçoit alors que les courbures des lentilles pourront être déterminées de manière que les rayons colorés provenant d'un même rayon de lumière blanche émergent sensiblement dans la même direction; ce qui est la condition de l'achromatisme. L'oculaire achromatique à deux verres de même nature est dû à Campani; le premier verre était placé en avant du foyer de l'objectif. Mais Ramsden a fait à cet appareil un changement important, qui consiste à placer le premier verre au delà de ce foyer. Il en résulte que, quand on place un micromètre au foyer de l'objectif, il reste fixe; tandis que, dans la disposition de Campani, il se mouvrait avec l'oculaire, et pourrait éprouver des dérangements par les petits mouvements qu'on est obligé de donner à l'oculaire pour l'accommoder aux différentes vues.

On a trouvé par le calcul et par l'expérience que dans l'oculaire achromatique de Campani les deux lentilles devaient être planes d'un côté, que les faces planes devaient être tournées toutes les deux vers l'objet, et que leur distance devait être à peu près égale à la demi-somme de leurs longueurs focales. En désignant par f et f' les distances focales des deux lentilles, on a trouvé que la longueur focale d'une seule lentille qui produirait le même grossissement serait $2ff' : f + f'$.

Dans l'oculaire achromatique de Ramsden les deux lentilles ont également une face plane; mais les faces courbes sont en regard, elles ont même longueur focale, et sont

Digitized by Google

placées à une distance l'une de l'autre égale aux deux tiers de la longueur focale commune.

1347. On peut mesurer le grossissement des lunettes astronomiques de la manière suivante : on règle la distance des verres de manière à voir nettement les objets éloignés ; alors, en désignant par F la distance focale de l'objectif et par f celle de l'oculaire, la longueur du tuyau est égale à $F+f$; on enlève ensuite l'objectif, on reçoit sur un écran l'image du cercle d'ouverture du tuyau formé par l'oculaire, et on mesure sa distance à l'oculaire. En désignant cette distance par m, on a évidemment

$$\frac{1}{F+f}+\frac{1}{m}=\frac{1}{f}, \quad \text{d'où} \quad \frac{F+f}{m}=\frac{F}{f}:$$

ainsi le grossissement est égal à la longueur du tuyau divisée par la longueur m.

Le champ de la lunette est la partie de l'espace qu'on peut apercevoir. Il est évidemment terminé par le cône qui a son sommet au centre optique de l'objectif, et pour base le cercle de l'oculaire : ainsi, en désignant par D la distance des deux verres, par R le rayon du cercle de l'oculaire, $R : D$ sera la tangente de la moitié de l'angle au centre du cône, et pourra servir de mesure au champ de l'instrument.

1348. *Lunettes terrestres.* Les lunettes que nous venons de décrire renversent les objets : cela est sans aucun inconvénient pour les observations astronomiques ; mais il n'en est pas de même des lunettes destinées à observer les objets terrestres ; il est nécessaire que la dernière image soit droite. Pour cela on compose l'oculaire de quatre verres (*fig.* 830) ; les deux premiers B et C ont pour objet de redresser l'image, et les deux derniers de compléter l'achromatisme : ils sont disposés comme dans l'oculaire de Campani ou de Ramsden. Le grossissement dépend des foyers des cinq verres et de l'intervalle qui les sépare ; en laissant les deux derniers oculaires fixes, et en faisant varier la position des autres dans de certaines limites, le grossissement variera. M. Cauchoix a établi ce mouvement dans de nouvelles lunettes qu'il nomme *polyaldes* ; ce grossissement varie de 20 à 40 ou de 30 à 50. Souvent aussi on emploie des lunettes à quatre verres (*fig.* 831) ; l'inspection seule de la figure suffit pour faire comprendre les effets produits par les verres.

1349. Pour trouver le grossissement de l'oculaire à trois verres, désignons par f la distance focale de l'objectif, et par f', f'', f''', les distances focales des trois verres qui forment l'oculaire, à partir de celui qui est le plus éloigné de l'œil : il est évident que si les distances focales f' et f'' sont égales, l'image $P''Q''$ sera égale à l'image $Q'P'$, et par conséquent les deux premières lentilles seront sans influence sur le grossissement qui résultera uniquement des distances focales de l'objectif et du dernier oculaire, et qui sera représenté par $f : f'''$. Dans le cas où les longueurs focales f' et f'' diffèrent, le rapport des diamètres des deux images $P''Q''$ et $Q'P'$ sera $f'' : f'$, et par conséquent le grossissement final sera $ff'' : f'f'''$. Dans la lunette à cinq verres le grossissement sera représenté par la même formule, en désignant par f'' la distance focale d'une lentille qui produirait le même grossissement que les deux dernières.

1350. Dans les lunettes terrestres, comme dans les lunettes astronomiques, il faut employer des objectifs d'un diamètre d'autant plus grand que l'on veut obtenir un plus fort grossissement, ou plus de netteté, car l'image n'est éclairée que par la lumière reçue par l'objectif.

Lorsque les objectifs dépassent 2 à 3 pouces de diamètre, il est très-difficile de se

Digitized by Google

procurer des plaques de flint-glass suffisamment homogènes; les bonnes lunettes achromatiques d'une grande ouverture sont rares, et d'un prix élevé.

Quelle que soit d'ailleurs cette ouverture, la détermination des courbures des lentilles les plus favorables pour détruire ou du moins pour rendre aussi petites que possible les aberrations de sphéricité et de réfrangibilité est un problème compliqué, que les constructeurs résolvent par tâtonnements.

1351. Étant très-difficile de se procurer des lentilles de flint-glass bien homogène lorsque le diamètre excède 4 à 5 pouces, M. Barlow a essayé d'achromatiser un objectif simple formé de verre ordinaire au moyen d'une lentille creuse plane-convexe, renfermant du sulfure de carbone, substance très-dispersive, placée à une certaine distance. M. Barlow a complétement réussi.

La lunette construite par ce physicien était formée d'un objectif de verre plan-convexe de $0^m,198$ d'ouverture et d'une longueur focale de $1^m,98$: à la distance de $1^m,016$ se trouvait une lentille divergente de sulfure de carbone; alors le foyer était porté en avant de cette lentille à $3^m,657$ de l'objectif; le grossissement pouvait s'élever jusqu'à 700.

1352. *Lunette de Galilée.* Cette lunette (*fig.* 832) n'est composée que de deux verres. L'oculaire est une lentille divergente, placée en avant du lieu de l'image $m'n'$ formée par l'objectif. Les rayons élémentaires qui composent chaque faisceau émané des différents points de l'objet deviennent sensiblement parallèles au delà de l'oculaire; mais ces faisceaux se croisent et leurs prolongements représentent l'image droite $m''n''$. Dans ces lunettes, la position de l'œil la plus favorable est très-près de l'oculaire, car, à mesure qu'il s'éloigne, il perd une partie des rayons. Cette disposition est employée pour les lunettes de spectacle, parce qu'elle permet de ne leur donner qu'une très-petite longueur; rarement on y emploie des objectifs achromatiques, parce qu'étant destinées à servir le soir, les couleurs qui s'y développent n'y sont pas très-vives, d'autant plus que leur grossissement n'est jamais fort considérable.

Quant à la mesure du grossissement, remarquons que l'angle $PAS = m'An'$ est celui sous lequel l'objet serait vu directement, et que l'image est aperçue sous l'angle $n''Om'' = m'on'$. Or on a

$$\text{tang}\,\frac{1}{2}\,m'on' : \text{tang}\,\frac{1}{2}\,m'An' :: oB,\ AB :$$

c'est-à-dire à peu près comme les distances focales de l'objectif et de l'oculaire.

Pour trouver la distance x des deux lentilles, désignons par F la distance focale de l'objectif, et par f celle de l'oculaire, par D la distance de la vision distincte, et remarquons que, pour une lentille divergente qui reçoit un faisceau convergent, l'équation des foyers conjugués est

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{a}.$$

Ainsi on aura

$$\frac{1}{F-x} + \frac{1}{D} = \frac{1}{f}, \quad \text{d'où} \quad x = F - \frac{fD}{D-f}.$$

Dans la lunette de Galilée, l'objectif étant convergent, tandis que l'oculaire est divergent, les effets dispersifs de ces deux verres sont opposés. On conçoit alors que, les lentilles étant construites avec des matières différentes, on pourrait déterminer les distances focales de manière à détruire l'aberration de réfrangibilité; mais alors, pour les mêmes substances, on serait borné à un grossissement qui ne pourrait pas

Digitized by Google

être dépassé. C'est l'oculaire qui devrait être formé de la substance la plus dispersive. En employant du flint-glass pour l'oculaire et du verre ordinaire pour l'objectif, le grossissement compatible avec l'achromatisme est 1,25; mais, en achromatisant partiellement l'objectif, on produit évidemment le même effet que si on employait pour l'oculaire une substance plus dispersive; et par conséquent on peut obtenir un plus fort grossissement.

1353. La condition nécessaire pour que la vision soit distincte dans tous les instruments que nous venons de décrire se réduit à ce que les rayons sortent de la lunette avec le degré de divergence convenable pour l'œil de l'observateur. On parvient à remplir cette condition en fixant les différents verres de l'instrument dans des tuyaux mobiles qui permettent de placer l'objectif et les oculaires aux distances qui conviennent à chaque individu. Il est nécessaire aussi de noircir l'intérieur des tuyaux afin d'éviter les réflexions qui troubleraient la netteté des images.

1354. *Télescope d'Herschell.* Cet appareil (*fig.* 833) est formé d'un tuyau au fond duquel se trouve un miroir métallique sphérique concave; les rayons émanés des objets extérieurs forment en avant du miroir une image *m'n'* que l'on regarde avec une loupe ou avec un oculaire achromatique. Dans cette disposition, l'observateur intercepterait une partie des rayons incidents; mais quand l'axe du miroir est un peu incliné sur l'axe du tuyau, l'image se forme hors de l'axe, et peut être portée hors du tuyau, où on peut l'observer sans intercepter aucune partie des rayons incidents. C'est avec un appareil semblable, qui avait 40 pieds de long, qu'Herschell a fait une partie de ses découvertes.

Il est facile de voir que dans cet instrument le grossissement est égal au rapport de la distance focale principale du miroir à celle de l'oculaire : car, si les rayons n'étaient pas déviés de leur direction (*fig.* 834), circonstance qui ne changerait pas le grossissement, en désignant par *o* le centre du miroir, par *o'* celui de l'oculaire, et par *mn* l'image formée au foyer du miroir, il est évident que l'objet vu à l'œil nu et à travers l'oculaire sera aperçu sous les angles *mon* et *mo'n*, et les tangentes des moitiés de ces angles sont évidemment dans le rapport des distances *po'* et *po*, qui sont précisément la distance focale de l'oculaire et la distance focale principale du miroir, puisque le foyer principal du miroir est situé à une distance du miroir égale à la moitié de son rayon.

1355. *Télescope de Newton.* Cet instrument est encore composé d'un tuyau terminé par un miroir (*fig.* 835); mais il renferme un petit miroir plan incliné à 45° qui rejette l'image *m'n'* perpendiculairement à sa direction, de sorte qu'on peut l'observer avec un oculaire situé parallèlement au tuyau. Cette disposition évite ainsi l'interposition de l'observateur dans les rayons incidents, ou l'inclinaison de l'axe du miroir; mais elle occasionne une perte de lumière considérable, par la réflexion sur le miroir plan. Newton lui avait substitué un prisme de verre rectangulaire (*fig.* 836); un des côtés de l'angle droit étant disposé perpendiculairement à la direction des rayons incidents, la réflexion sur la face inclinée a lieu sans absorption sensible. Cet instrument est très-incommode pour les recherches astronomiques, à cause de la position de l'observateur. Les appareils suivants n'ont point cet inconvénient.

Dans le télescope de Newton le grossissement est évidemment le même que si les rayons n'étaient pas réfléchis par le miroir plan, et si on pouvait observer directement l'image *m'n'* avec l'oculaire : alors le grossissement est, comme dans celui d'Herschell, le rapport entre la distance focale du miroir et celle de l'oculaire.

1356. *Télescope de Grégori* (*fig.* 837). Le miroir plan du télescope de Newton est remplacé par un petit miroir concave, et le grand miroir est percé à son centre d'une ouverture qui reçoit l'oculaire. Les rayons réfléchis sur le grand miroir forment

Digitized by Google

une image $m'n'$; cette dernière, réfléchie dans le petit miroir, forme une autre image $m''n''$ que l'on regarde directement avec l'oculaire.

Quant au grossissement, il dépend à la fois des distances focales F et F' des deux miroirs, de leur distance D et de la distance focale f du système des oculaires. Pour obtenir la valeur du grossissement en fonction de ces différents éléments, remarquons que, si l'oculaire était placé derrière l'image $m'n'$, le grossissement serait, dans les télescopes d'Herschell et de Newton, $F : f$; et, si l'oculaire était placé ensuite derrière l'image $m''n''$, le grossissement varierait dans le rapport de $m''n''$ à $m'n'$: ainsi il sera $Fm''n'' : fm'n'$. Or, le rapport entre $m''n''$ et $m'n'$ est évidemment le même que celui des distances des foyers conjugués du petit miroir à son centre; mais la distance de l'image $m'n'$ au miroir est égale à $D - F$, et par conséquent sa distance au centre est égale à $2F' - (D - F) = F + 2F' - D$. Quant à la distance de l'image $m''n''$ au centre du miroir, elle est évidemment égale à $p' - 2F'$, en désignant par p' la distance de cette image au miroir; et on a pour déterminer p' la relation

$$\frac{1}{D-F} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{F'}; \quad \text{d'où} \quad p' = \frac{(D-F)F'}{D-F-F'}:$$

alors on trouve pour $p' - 2F'$, $\qquad \dfrac{F'(2F+F-D)}{D-F-F'}$,

et pour le grossissement, $\qquad \dfrac{FF'}{f} \times \dfrac{1}{D-F-F'}$.

Il est par conséquent variable avec la distance D des miroirs, qui, pour une même distance des objets, change avec la distance de la vision distincte.

1357. *Télescope de Cassegrain.* Cet instrument ne diffère du précédent que par la forme du petit miroir, qui est convexe (*fig.* 838). Cette disposition a l'avantage de détruire les aberrations de sphéricité des deux miroirs, parce qu'elles sont en sens contraire. Il est évident que pour que l'image $m''n''$ se forme, il faut que le petit miroir soit en avant du lieu où se formerait la première image : car les rayons reçus par le miroir convexe étant convergents, sont réfléchis sous une plus faible convergence et vont alors former l'image $m''n''$.

Le télescope de Cassegrain est plus court que celui de Grégori de plus de deux fois la longueur focale du petit miroir; il donne plus de lumière, et a moins d'aberrations de sphéricité.

Dans tous les télescopes, les miroirs métalliques doivent avoir le poli le plus parfait, et le tuyau doit être noirci intérieurement.

Les télescopes ont l'avantage de ne point colorer les images lorsque les oculaires sont achromatiques; mais ils absorbent beaucoup de lumière, et pour avoir de forts grossissements il faut employer de très-grands miroirs et des instruments d'une grande longueur. Pour les observations astronomiques, on préfère des lunettes achromatiques; celles de 10 pouces d'ouverture produisent plus d'effet que les plus grands télescopes connus.

1358. M. Amici a construit sur le même principe que les télescopes dont nous venons de parler des microscopes qui dans quelques circonstances paraissent avoir un grand avantage sur ceux que nous avons décrits. Ils sont formés d'un tube de cuivre horizontal dont le fond est garni d'un miroir métallique elliptique, et l'autre extrémité d'un système d'oculaires. En avant du miroir métallique, et à son foyer le plus voisin, se trouve un petit miroir plan incliné à 45°; au-dessous du miroir le tuyau est percé d'une ouverture par laquelle arrivent les rayons émanés de l'objet, qui est placé

Digitized by Google

au-dessous du tuyau à une distance suffisante pour qu'on puisse toujours l'éclairer fortement, ou par des miroirs ou par des lentilles. D'après cette description on concevra facilement la marche des rayons : les rayons émanés de l'objet se réfléchissent sur le miroir plan, et, après avoir éprouvé une nouvelle réflexion sur le miroir elliptique, se réunissent à son autre foyer et y forment une image que l'on regarde avec le système des oculaires. La forme elliptique du miroir a pour objet d'éviter l'aberration de sphéricité. La figure 859 représente cette disposition. (Voyez, pour plus de détails, *Annales de chimie et de physique*, t. XVII.)

§ IV. *Coloration de la lumière en passant à travers les lames minces.*

1359. Lorsque la lumière traverse des lames d'une grande ténuité, les rayons réfléchis et émergents prennent des teintes variées analogues à celles que présente le spectre solaire. Ainsi les bulles de savon, le verre soufflé, tous les liquides volatils répandus en lames minces sur des corps polis d'une teinte foncée, l'huile d'olive déposée sur un liquide noir, présentent les couleurs les plus brillantes. Avec un peu de soin on peut facilement détacher d'une lame de mica incolore des feuilles très-minces qui prennent des teintes très-vives de rouge ou de vert. L'air jouit aussi de la même propriété, lorsqu'il est renfermé en lames très-minces entre deux plaques transparentes, par exemple entre deux plaques de verre que l'on presse fortement l'une contre l'autre. Nous allons décrire, d'après Newton, ces phénomènes et leurs lois, et ce ne sera que plus tard que nous exposerons les différentes hypothèses émises pour les expliquer.

1360. Si, après avoir placé une lentille biconvexe *AB* (*fig.* 840), ayant une très-grande distance focale, sur un plan *CD*, on fait arriver sur la lentille un rayon de lumière blanche, l'œil étant placé de manière à recevoir la lumière réfléchie, on apercevra au point de contact une *tache noire*, et autour une série d'anneaux colorés, dans lesquels les teintes se succèdent dans l'ordre suivant : (nous rapportons les propres expressions de Newton.)

« Après la tache noire centrale, formée au contact des verres, venaient le bleu, le blanc et le rouge : le bleu était en très-petite quantité, le jaune et le rouge étaient assez abondants et occupaient ensemble à peu près autant de place que le blanc, et quatre ou cinq fois plus que le bleu. Immédiatement après cette première série, il en venait une autre où l'on distinguait le violet, le bleu, le vert, le jaune et le rouge : toutes ces couleurs étaient abondantes et vives, excepté le vert, qui était en fort petite quantité, et qui paraissait beaucoup plus pâle et plus faible que le reste; le violet occupait moins de place qu'aucune des quatre autres couleurs, et le bleu moins que le jaune ou le rouge. La troisième série de couleurs était le pourpre, le bleu, le vert, le jaune et le rouge : ici le pourpre semblait plus rougeâtre que le violet de la série précédente, et le vert était beaucoup plus visible, étant aussi vif et en aussi grande quantité qu'aucune des autres couleurs, excepté le jaune; mais le rouge commençait à se ternir un peu, tirant extrêmement sur le pourpre. Ensuite venait la quatrième série, composée de vert et de rouge : le vert était fort abondant et très-vif, tirant d'un côté sur le bleu, et de l'autre sur le jaune; mais dans cette quatrième série, il n'y avait ni violet, ni bleu, ni jaune, et le rouge était fort imparfait. Les couleurs qui succédaient à celles-ci étaient de plus en plus faibles et indécises, jusqu'à ce qu'après trois ou quatre révolutions, elles dégénéraient insensiblement en blanc. La distribution des couleurs était alors, à partir du centre : noir, bleu, blanc, jaune, rouge; violet, bleu, vert, jaune, rouge; pourpre, bleu, vert, jaune, rouge; vert, rouge; bleu-verdâtre, rouge; bleu-verdâtre, rouge-pâle; bleu-verdâtre, blanc-rougeâtre. »

Digitized by Google

Pour bien observer ces successions de teintes, il faut employer une lentille ayant une très-grande distance focale; la lentille dont Newton s'est servi avait 51 pieds anglais de foyer. Pour produire la tache noire centrale, il faut un peu frotter la lentille contre le verre afin d'établir le contact. En soulevant la lentille, chaque anneau se rapproche du centre en s'étalant, s'y réfugie et disparaît. Ce phénomène donne un moyen très-simple de bien observer les teintes dont se compose chaque anneau. On peut aussi agrandir les anneaux en les observant au moyen d'une loupe.

Lorsque les rayons incidents s'inclinent sur la surface de la lentille, les anneaux s'élargissent et prennent une forme elliptique.

1361. En plaçant l'œil de manière à recevoir les rayons transmis à travers la lentille et la plaque, on observe un cercle blanc au point de contact, et une suite de cercles irisés dans lesquels les teintes se succèdent de telle manière que les anneaux vus par réflexion et par réfraction qui occupent le même lieu ont des couleurs complémentaires; mais les anneaux par transmission sont beaucoup plus faibles que les anneaux réfléchis.

1362. Si on place un liquide quelconque entre la lentille et le verre, les mêmes phénomènes ont encore lieu, les couleurs des anneaux sont les mêmes et se succèdent toujours dans le même ordre; on ne trouve de différence que dans le diamètre des anneaux et l'étendue absolue qu'occupent les couleurs de chacun d'eux. En opérant dans le vide, les anneaux ont les mêmes dimensions et les mêmes teintes que dans l'air; enfin une lame mince transparente dont l'épaisseur va en croissant produit des franges irisées dans lesquelles les teintes se succèdent dans le même ordre : c'est ce qu'on peut vérifier en répandant une huile volatile sur un liquide noir, et dans les bulles de savon.

1363. *Anneaux colorés formés dans une lame d'air, sous l'incidence perpendiculaire, par une lumière homogène.* Revenons maintenant aux anneaux formés entre deux plaques de verre. Ces anneaux se forment réellement dans l'espace qui sépare les deux verres, car ils ne changent ni avec la nature, ni avec l'épaisseur des plaques; mais ils se déplacent avec le point de contact des plaques, et sont d'autant plus étalés que la distance des deux plaques varie plus lentement autour du point de contact.

Newton, pour analyser ces phénomènes, répéta les expériences en employant de la lumière homogène : il reconnut alors qu'il se formait par réflexion et par transmission une série d'anneaux alternativement noirs et de la couleur du rayon, qui se serraient d'autant plus qu'ils s'éloignaient davantage du point de contact de la lentille, et que le lieu des anneaux colorés par réflexion était celui des anneaux obscurs par réfraction. Les mêmes apparences se manifestaient quelle que fût la teinte du rayon; mais les diamètres des anneaux de même ordre variaient avec la teinte du rayon. Il résulte évidemment de là que les anneaux diversement colorés qu'on aperçoit dans la lumière blanche résultent de la superposition partielle des anneaux produits par les rayons de différentes teintes qui existent dans la lumière blanche.

1364. Newton procéda alors à la mesure des diamètres des anneaux colorés réfléchis sous une incidence presque perpendiculaire, par des rayons homogènes, en plaçant l'œil très-près de l'axe de la lentille à une grande hauteur, et en prenant sur la lentille à l'aide d'un compas, le diamètre de chaque anneau dans sa partie la plus brillante et dans des points également distants de l'œil : il trouva ainsi que les carrés des diamètres des anneaux successifs d'une même teinte étaient entre eux comme les carrés des nombres impairs 1, 3, 5, 7, 9, etc.; et que les carrés des diamètres des anneaux transmis étaient entre eux comme la série des nombres pairs 0, 2, 4, 6, 8, etc. Mais les diamètres des anneaux ne sont pas les mêmes que si la lame mince était

Digitized by Google

isolée : la lentille supérieure les agrandit. Il fallait alors déterminer les diamètres des anneaux dans la lame d'air, en prolongeant par réfraction à travers la lentille les rayons émergents correspondant aux extrémités des diamètres des anneaux : les points de rencontre des rayons réfractés avec la seconde surface du verre supérieur sont évidemment les extrémités des diamètres des anneaux dans la lame mince. Newton en faisant ce calcul reconnut que les diamètres des anneaux dans la lame mince suivaient exactement les mêmes lois que ceux des anneaux observés.

Soient ZCC' (*fig.* 841) l'axe de la lentille, YC sa surface supérieure, et $Y'C'$ sa surface inférieure : ces surfaces appartenant à des sphères d'un rayon très-grand par rapport aux diamètres des anneaux, on peut considérer ces deux surfaces comme étant planes. Alors, si nous désignons par h la hauteur CZ de l'œil, par θ l'angle d'incidence, par θ' l'angle de réfraction, par e l'épaisseur du verre, et par y et y' les demi-diamètres MC et $M'C'$, on aura, à cause de la petitesse des angles θ et θ',

$$\theta = \frac{y}{h}, \quad \theta' = \frac{\theta}{n}, \quad \text{par conséquent } M'N' = e\theta' = \frac{ey}{nh},$$

$$\text{et} \quad y' = y\left(1 + \frac{e}{nh}\right).$$

On voit d'après cela que les rapports des diamètres vrais sont les mêmes que ceux des diamètres apparents.

La détermination directe des diamètres des anneaux colorés dans la lame d'air pourrait se faire directement d'une manière bien simple : si on trace sur la plaque de verre inférieure et sur la face en contact avec la lentille, avec une pointe de diamant, des lignes très-fines et également espacées, on verra à la fois ces divisions et les anneaux, et la distance de la division qui coïncide avec un anneau à celle qui se trouve au point de contact sera évidemment le demi-diamètre de l'anneau dans la lame d'air (M. Babinet).

1365. Il fallait alors déterminer les épaisseurs de la lame d'air correspondantes aux anneaux. Or, il est facile de démontrer que la distance d'un point quelconque de la surface inférieure de la lentille à la lame CD est proportionnelle au carré de sa distance au point de contact : par conséquent, les épaisseurs de la lame d'air correspondantes aux milieux des largeurs des anneaux sont :

Pour les anneaux réfléchis, comme 1 : 3 : 5 : 7 : 11, etc.

Pour les anneaux transmis, comme 0 : 2 : 4 : 6 : 8, etc.

En effet, soient AB (*fig.* 842) la sphère inférieure de la lentille, PQ le plan sur lequel elle est posée MM' le diamètre d'un anneau, MD l'épaisseur de la lame d'air correspondante, on a

$$MB^2 = BC \times AB, \quad \text{d'où} \quad e = \frac{y^2}{2r},$$

e étant l'épaisseur MD ou BC de la lame d'air, y le rayon de l'anneau MC ou MB, car cette dernière quantité diffère très-peu de la première, et r le rayon du cercle.

Si, au lieu d'un plan et d'une lentille biconvexe, on employait une lentille biconvexe et une lentille concave, on obtiendrait encore le même résultat. En effet, soient MBM' et DBD' (*fig.* 843) les deux surfaces sphériques renfermant la lame d'air, r et r' leurs rayons, on a évidemment, d'après ce qui précède,

$$ME = \frac{y^2}{2r}, \quad DE = \frac{y^2}{2r'} \quad \text{et} \quad e = ME - DE = y^2\left(\frac{1}{2r} - \frac{1}{2r'}\right).$$

Digitized by Google

Il résulte évidemment de ces deux lois que, si la lame d'air était renfermée entre une surface plane et une surface conique (*fig.* 844), les milieux des largeurs des anneaux réfléchis et réfractés seraient à des distances égales.

Newton ayant reconnu ensuite que les différences d'épaisseur des lames d'air correspondantes aux périmètres intérieurs et extérieurs des anneaux brillants et obscurs étaient constantes, il en résulte que, dans le cas de la fig. 844, tous les anneaux réfléchis ou transmis ont la même largeur, et que la distance du point A à la circonférence intérieure du premier anneau réfléchi est égale à la moitié de la largeur d'un anneau : car, les distances du point A aux milieux des anneaux successifs réfléchis et transmis sont représentés par les nombres 1, 2, 3, 4, 5, etc., et la différence constante 1 est égale à deux demi-largeurs d'anneau, et par suite $Aa = 1 - 1/2 = 1/2$. Ainsi, en désignant par e l'épaisseur de l'air correspondante à la circonférence du premier anneau réfléchi, les épaisseurs de l'air aux périmètres intérieurs et extérieurs des anneaux successifs seront e, $3e$, $5e$, $7e$, $9e$ etc., et les épaisseurs, d'air correspondantes aux milieux des anneaux seront, pour les anneaux réfléchis, $2e$, $6e$, $10e$, $14e$, etc., et pour les anneaux transmis 0, $4e$, $8e$, $12e$, $16e$, etc.

Ces rapports restent les mêmes, quelles que soient la teinte du rayon simple, la nature du corps dont la lentille et la plaque sont formées, ainsi que celle de la substance qui forme la lame mince. Mais pour chaque couleur et chaque lame mince, l'épaisseur absolue de la lame mince correspondante à un anneau de même rang est variable : cette épaisseur augmente du violet au rouge.

1366. Newton a reconnu, par des expériences nombreuses, que les diamètres des anneaux de même rang formés avec les différents rayons correspondants aux limites des sept couleurs qu'il avait distinguées dans le spectre étaient entre eux comme les racines cubiques des nombres

$$1, \frac{9}{8}, \frac{5}{6}, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{9}{16}, \frac{1}{2};$$

alors les épaisseurs des lames d'air correspondantes, étant proportionnelles aux carrés des diamètres, sont entre elles comme les carrés de ces racines cubiques.

Le tableau suivant donne le résultat de ces calculs :

Désignation des couleurs.	Épaisseur de la lame d'air au périmètre intérieur du premier anneau.
Rouge extrême	e
Limite du rouge et de l'orangé	e . 0,9248
Limite de l'orangé et du jaune	e . 0,8855
Limite du jaune et du vert	e . 0,8255
Limite du vert et du bleu	e . 0,7655
Limite du bleu et de l'indigo	e . 0,7114
Limite de l'indigo et du violet	e . 0,6814
Violet extrême	e . 0,6500

Pour l'air, la valeur de e estimée en millionièmes de pouces anglais est 5, 172206; et, comme le pouce anglais vaut $25^{mm},39954$, cette valeur de e en millimètres est $0^{mm},00008057$.

A l'aide de ces résultats et de la loi que suivent les diamètres des anneaux des différents ordres, on peut facilement trouver les épaisseurs des lames d'air correspondantes aux diamètres intérieurs et extérieurs des anneaux de tous les ordres et de toutes les teintes.

Digitized by Google

1367. *Anneaux formés dans une lame d'air, sous une incidence quelconque, par une lumière homogène.* Dans les expériences que nous venons de rapporter, Newton observait les anneaux le plus perpendiculairement possible. Si on abaisse l'œil en s'écartant peu à peu de cette position, on voit les anneaux s'agrandir en se dilatant circulairement de tous côtés; mais dans chaque position de l'œil les lois sont les mêmes. Newton a trouvé, par l'observation, la loi suivant laquelle les épaisseurs de l'air variaient en raison de l'angle sous lequel la réflexion avait lieu.

Par la comparaison d'un très-grand nombre d'observations, Newton a trouvé qu'en désignant par e et e' les épaisseurs d'une substance qui réfléchissent le même anneau sous l'incidence perpendiculaire et sous l'incidence r, jusqu'à $r = 60°$, l'épaisseur e' était assez bien représentée par la formule

$$e' = \frac{e}{\cos r};$$

mais la formule la plus exacte, celle qui donne des valeurs de e' qui s'accordent avec l'expérience pour toutes les inclinaisons, est

$$e' = \frac{e}{\cos u} \text{ dans laquelle on a, pour déterminer } u, \sin u = \frac{105 + n}{106} \sin r;$$

n étant l'indice de la substance de la lame mince par rapport au milieu superposé. Dans le cas des anneaux formés par une lame d'air renfermée entre deux lames de verre, n est l'indice renversé de la lame de verre.

1368. *Anneaux formés sous une incidence quelconque par une lumière homogène dans une lame mince d'un corps quelconque.* Toutes les expériences que nous venons de rapporter sont relatives à une lame d'air. Pour tous les autres gaz, et en général pour tous les corps transparents, les phénomènes sont encore les mêmes, et ils suivent exactement les mêmes lois; seulement les valeurs absolues des diamètres des anneaux de même couleur et de même ordre sont d'autant plus petites que la substance a une plus grande puissance réfractive. Ces variations se font suivant une loi très-simple qui peut s'énoncer ainsi : *Dans deux lames de différente nature, les épaisseurs qui réfléchissent ou transmettent un anneau de même ordre sous la même incidence sont entre elles dans le rapport inverse des indices de réfraction.*

Soient n l'indice de réfraction de la lame mince pour des rayons qui pénètrent dans la lame en sortant du vide, n' l'indice pour le vide et l'air, e' et e les épaisseurs de la lame de la substance et de la lame d'air qui, vues l'une et l'autre sous la même incidence, réfléchissent la même teinte, on a, d'après Newton,

$$e' = \frac{n}{n'} e.$$

On peut vérifier cette loi par une expérience facile à répéter : on prend deux lames de verre à peu près planes et bien sèches, on les applique l'une sur l'autre, il se produit des anneaux très-larges et très-distincts; on laisse tomber une goutte d'eau sur le bord des plaques, elle s'introduit entre elles par la capillarité; mais tout l'air ne sera pas chassé, et on aura des anneaux formés dans l'air et dans l'eau partant d'un centre commun : alors on regarde les anneaux le plus perpendiculairement possible, et on trouve que le 4e anneau dans l'air coïncide avec le 5e dans l'eau. Or, si on désigne par e et e' les épaisseurs de la lame d'air et de la lame d'eau dans le 1er anneau, les épaisseurs dans les anneaux suivants seront

Pour l'air e, $3e$, $5e$, $7e$, $9e$...
Pour l'eau e', $3e'$, $5e'$, $7e'$, $9e'$...

Digitized by Google

Ainsi l'épaisseur de la lame d'air à l'endroit du 4e anneau sera $7e$, et celle de la lame d'eau sera $9e'$; et, puisque ces deux épaisseurs sont égales, nous aurons

$$9e' = 7e, \quad \text{d'où} \quad \frac{e}{e'} = \frac{7}{9},$$

rapport peu différent de celui des indices de réfraction de l'air et de l'eau.

On peut former des anneaux colorés avec les différents gaz en faisant le vide entre la lentille et la plaque, et en y introduisant le gaz sur lequel on veut opérer. Pour observer les anneaux colorés qui se forment dans les liquides, il suffit d'introduire une goutte du liquide entre la lentille et la plaque: par la capillarité elle pénètre bientôt autour du point de contact. On peut aussi observer les anneaux colorés sur des bulles de savon. Pour cela, il faut les renfermer sous des cloches, afin d'éviter le desséchement, qui les fait crever promptement: il est alors plus avantageux de les déposer sur la surface du liquide même qui a servi à les former; on obtient un hémisphère dont l'épaisseur va en croissant depuis le sommet jusqu'à la circonférence qui s'appuie sur le liquide.

La loi que suivent les anneaux colorés formés dans différentes substances diaphanes explique plusieurs phénomènes en apparence assez singuliers.

1369. Lorsqu'on observe les anneaux colorés formés dans une lame d'air, les diamètres des anneaux restent les mêmes lorsque l'on raréfie l'air, même lorsque l'appareil est placé dans le vide le plus parfait que nous puissions produire: la raison en est que l'indice de réfraction de l'air étant très-voisin de l'unité, les variations qu'il éprouve par la dilatation ne peuvent pas altérer les diamètres des anneaux d'une manière sensible.

1370. Lorsqu'on introduit de l'eau entre la lentille et la lame, les anneaux deviennent beaucoup plus petits, et ne changent pas de diamètre par l'inclinaison de l'œil, tandis que les anneaux produits dans l'air éprouvent au contraire de très-grandes variations dans les mêmes circonstances. Cette différence provient de ce que le rayon qui traverse la lame d'eau, étant fortement réfracté, s'écarte peu de sa direction par l'inclinaison du rayon incident, tandis que le rayon qui passe dans l'air s'écarte beaucoup de sa direction à mesure qu'il devient plus oblique: or, comme c'est l'épaisseur de la lame traversée par le rayon qui détermine la position des anneaux, on voit qu'ils doivent peu varier dans l'eau par inclinaison, et qu'il n'en est pas ainsi pour l'air.

1371. *Anneaux formés par la lumière blanche.* Jusqu'ici nous avons toujours supposé que les lames minces étaient éclairées par des rayons homogènes; supposons maintenant qu'ils le soient par des rayons de lumière blanche. La lumière blanche étant formée de rayon de toutes les couleurs, chacun d'eux formera la série d'anneaux qu'il aurait produite s'il eût éclairé isolément la lame mince: il se formera donc une infinité de systèmes d'anneaux de différentes couleurs. Mais les anneaux de même ordre appartenant aux différentes couleurs, n'ayant pas le même diamètre, anticiperont les uns sur les autres, et formeront des anneaux dont les teintes seront variables selon la couleur des anneaux superposés; et, à une certaine distance, ils ne produiront plus qu'une teinte uniforme de lumière blanche.

Pour concevoir l'anéantissement des anneaux colorés à une certaine distance du centre, il faut revenir à ce qui se passe quand la lumière est homogène. En faisant arriver un faisceau de rayons rouges sur une lame d'air renfermée entre une lentille et une lame plane, on voit les anneaux se resserrer d'autant plus qu'ils s'éloignent davantage du centre, et disparaître à une certaine distance; et comme ils s'évanouis-

Digitized by Google

sent de même quand la lame d'air est renfermée entre deux surfaces planes, la disparition ne tient pas au rapprochement des anneaux : elle *provient uniquement* de ce que les rayons de lumière que nous considérons comme *homogènes* ne le sont point, puisque la réfrangibilité des rayons varie d'une manière continue d'une des extrémités du spectre à l'autre : par conséquent, quelque petit que soit le faisceau coloré pris dans le faisceau qui a traversé un prisme, il est réellement composé d'un grand nombre de rayons ayant des indices de réfraction différents. Alors chacun d'eux donnera des anneaux qui coïncideront d'abord sensiblement, mais qui s'écarteront les uns des autres à mesure qu'ils s'éloigneront du centre ; les teintes s'affaibliront d'abord et à une certaine distance les parties lucides des uns coïncideront avec les parties obscures des autres, et les anneaux disparaîtront. On voit facilement d'après cela la cause de la disparition des anneaux irisés dans la lumière blanche. L'exactitude de cette explication est confirmée par une expérience facile à répéter : si on regarde les anneaux à travers un prisme, la dispersion les sépare, et on en aperçoit un nombre incomparablement plus grand qu'à l'œil nu.

1372. Newton a donné une construction géométrique pour trouver immédiatement la teinte des anneaux réfléchis ou réfractés sous une épaisseur donnée ; comme elle est très-simple, nous la décrirons avec détail. Rappelons-nous d'abord que les épaisseurs d'air ou de tout autre corps diaphane correspondantes aux limites des anneaux d'une même couleur forment la progression arithmétique

$$e, 3e, 5e, 7e.....$$

Ainsi, en divisant une ligne indéfinie zz' en parties égales à e (*fig.* 843), depuis l'épaisseur zéro jusqu'à $z1$ les rayons seront transmis ; depuis l'épaisseur $z1$ jusqu'à l'épaisseur $z3$ les rayons seront réfléchis ; de $z3$ et à $z5$ ils seront transmis, et ainsi de suite. Mais le maximum de réflexion aura lieu aux épaisseurs $z2$, $z6$, $z10$, qui suivent la progression arithmétique des nombres impairs ; et le maximum de transmission aura lieu pour les épaisseurs $z4$, $z8$, $z12$, etc., qui suivent la progression arithmétique des nombres pairs. Ainsi, pour connaître si une épaisseur donnée réfléchit ou transmet cette couleur, on portera cette épaisseur sur la ligne zz' de z en x, et la position du point x fera connaître l'effet qui sera produit ; mais il faut remarquer que la transmission est totale dans les épaisseurs qui lui sont assignées, au lieu que la réflexion se dégrade à partir de la ligne moyenne.

Pour rendre cette construction générale, prenons sur la ligne UAH (*fig.* 846) des distances UA, UB, UC, UD, UE, UF, UG, UH, proportionnelles aux nombres 0,6300, 0,6815, 0,7114, 0,7655, 0,8255, 0,8855, 0,9248,1, qui représentent les différentes valeurs de e pour les sept principales couleurs du spectre ; par les points A, B, C, D, E, F, G, H, élevons des perpendiculaires indéfinies sur AH ; divisons la ligne Aa en parties égales entre elles et à la valeur de e pour les rayons violets extrêmes, et joignons ces points avec le point U par des droites que nous prolongerons jusqu'à la ligne Hh. Il est évident, d'après cette construction, que toutes les droites Aa, Bb, Cc, etc., seront divisées en parties égales entre elles à la valeur de e correspondante : par conséquent, la figure représente, pour toutes les couleurs du spectre, une construction analogue à celle de la fig. 845.

Cette construction peut évidemment s'appliquer à des lames minces de toute espèce, puisque les anneaux suivent toujours les mêmes lois ; il faudrait seulement changer les valeurs absolues des épaisseurs auxquelles ils se forment.

Il est facile, d'après cette construction, de trouver les teintes composées, réfléchies ou réfractées à diverses épaisseurs.

Digitized by Google

« Si on conçoit (Newton opti.) que les rayons hétérogènes sont tour à tour réfléchis dans les espaces 1*IL*3, 5*MO*7, etc., et transmis dans les espaces *AHI*1, 3*LM*5, 7*OP*9, etc., il sera facile de savoir quelle couleur doit paraître en plein air, à telle ou telle épaisseur d'un corps mince transparent : car, en appliquant une règle parallèle à *AH*, à la distance de *AH* qui représente l'épaisseur du corps transparent, les espaces alternes 1*IL*3, 5*MO*7, etc., croisés par la règle, désigneront les couleurs primitives réfléchies dont est composée celle qui paraît en plein air à telle ou telle épaisseur. Pour savoir, par exemple, quelle est l'espèce de vert qui doit paraître dans le troisième anneau, il suffira d'appliquer la règle sur $\pi\ \rho\ \sigma\ \varphi$, puis de la faire passer sur quelques parties du bleu en π et du jaune en ρ : alors on trouvera que le vert visible à cette épaisseur du corps est principalement composé de vert primitif, mêlé d'un peu de bleu et de jaune.

» On peut aussi connaître par cette méthode comment les couleurs doivent se succéder à partir du centre des anneaux : car, si on fait successivement mouvoir la règle depuis *AH* à travers toutes les distances, après qu'elle aura passé par dessus le premier espace, qui ne désigne que peu ou point de réflexion causée par les corps les plus minces, elle arrivera précisément à 1, c'est-à-dire au violet, bientôt au bleu et au vert qui conjointement avec ce violet composent du bleu ; ensuite au jaune et au rouge, qui conjointement avec ce bleu composent du blanc. Ce blanc règne jusqu'à ce que le bord de la règle arrive à 3 ; mais les couleurs dont il est composé venant à manquer successivement, il se change d'abord en jaune composé, puis en rouge, et ce rouge disparaît enfin en *L*.

» Là commencent les couleurs du second anneau. Plus vives que celles du premier, parce qu'elles sont dilatées et mieux séparées l'une de l'autre, elles se succèdent par ordre, tandis que le bord de la règle passe de 5 en *O*. Par la même raison, au lieu de blanc paraît entre le bleu et le jaune un mélange d'orange, de jaune, de vert, de bleu et d'indigo, duquel doit résulter un vert lavé et imparfait.

» De même, les couleurs du troisième anneau se succèdent par ordre. D'abord vient le violet : un peu mêlé au rouge du second anneau, il forme une espèce de pourpre rougeâtre. Ensuite viennent le bleu et le vert : moins mêlés à d'autres couleurs, ils sont plus vifs que les précédents, surtout le vert. Suit le jaune, dont la partie du côté du vert est distincte, mais dont la partie du côté du rouge forme un jaune qui, mêlé au violet et au bleu du quatrième anneau, compose différentes nuances d'un rouge pourpre : ce violet et ce bleu, qui devraient succéder à ce rouge, se trouvent confondus avec lui. Vient un vert d'abord fort bleuâtre, ensuite assez franc : c'est la seule couleur vive et pure qui paraisse dans ce quatrième anneau ; mais bientôt il commence à tirer sur le jaune, et à se mêler aux couleurs du cinquième anneau. A raison de ce mélange, le jaune et le rouge, qui viennent immédiatement après, sont très-faibles et indécis, particulièrement le jaune, qui, étant la plus faible des couleurs, est à peine sensible. Après cela, les différents anneaux et leurs couleurs s'entremêlent et se confondent de plus en plus, jusqu'à ce que, après trois ou quatre révolutions, où le bleu et le rouge dominent, tous les rayons hétérogènes, mêlés assez également, composent un blanc uniforme. »

Il est facile de déterminer par la même méthode les teintes élémentaires des anneaux réfractés.

On voit facilement, à l'aide de cette figure, que les anneaux colorés doivent disparaître à une certaine épaisseur : car, à mesure que l'épaisseur croît, le nombre des teintes réfléchies ou réfractées augmente ; et il existe une épaisseur où toutes les teintes sont à la fois réfléchies ou réfractées, et par conséquent où l'on ne peut plus apercevoir que de la lumière blanche.

Digitized by Google

1373. Cette construction fait connaître l'ordre et l'espèce des *couleurs simples* qui sont réfléchies ou transmises à chaque épaisseur ; mais, pour en *déduire les teintes* qui résultent de ces mélanges, il faudrait connaître la loi suivant *laquelle varie* l'intensité de la lumière dans l'étendue de chaque anneau : alors, connaissant le nombre et l'intensité des couleurs, à l'aide de la construction *fig.* 783, on déterminerait la nature et l'intensité de la teinte résultante. C'est ce que Newton a fait; mais il n'a point fait connaître la méthode qu'il avait employée pour déterminer la loi des intensités de la lumière dans l'épaisseur des anneaux, ni même l'énoncé de cette loi. M. Biot est arrivé exactement aux résultats de Newton, en supposant que le carré de l'intensité est proportionnel aux ordonnées d'un cercle décrit sur l'épaisseur de l'anneau comme diamètre.

Voici la table des teintes correspondantes à différentes épaisseurs d'air, d'eau et de verre, telle que Newton l'a donnée.

	COULEURS RÉFLÉCHIES.	ÉPAISSEURS DES LAMES EN MILLIONIÈMES DE POUCES ANGLAIS		
		D'AIR.	D'EAU.	DE VERRE.
1er ORDRE.	Très-noir	1/2	3/6	10/51
	Noir	1	5/4	20/51
	Commencement de noir	2	1 1/8	1 3/7
	Bleu	2 2/5	1 4/5	1 11/20
	Blanc	5 1/4	3 7/8	3 2/5
	Jaune	7 1/9	5 1/3	4 3/5
	Orangé	8	6	5 1/6
	Rouge	9	6 3/4	5 4/5
2e ORDRE.	Violet	11 1/6	8 3/8	7 1/5
	Indigo	12 5/6	9 5/8	8 9/11
	Bleu	14	10 1/2	9
	Vert	15 1/8	11 1/2	9 5/7
	Jaune	16 2/7	12 1/6	10 2/3
	Orangé	17 3/9	13	11 1/9
	Rouge éclatant	18 1/3	13 3/4	11 5/6
	Écarlate	19 2/3	14 3/4	12 2/3
3e ORDRE.	Pourpre	21	15 3/4	13 10/20
	Indigo	22 1/10	16 4/7	14 1/4
	Bleu	23 2/5	17 11/20	15 1/10
	Vert	25 1/5	18 3/10	16 1/4
	Jaune	27 1/7	20 1/3	17 1/2
	Rouge	29	21 3/4	18 3/7
	Rouge bleuâtre	32	24	20 1/3
4e ORDRE.	Vert bleuâtre	34	25 1/2	22
	Vert	35 2/7	26 1/2	22 3/4
	Vert jaunâtre	36	27	23 3/9
	Rouge	40 1/3	30 1/4	26
5e ORDRE.	Bleu verdâtre	46	34 1/2	29 2/3
	Rouge	52 1/2	39 3/8	34
6e ORDRE.	Bleu verdâtre	58 3/4	44	38
	Rouge	65	48 3/4	42
7e ORDRE.	Bleu verdâtre	71	53 1/4	45 4/5
	Rouge	77	57 3/4	49 1/3

Digitized by Google

1374. Au moyen de cette table, on peut déterminer l'épaisseur d'une lame mince lorsqu'on connaît la couleur qu'elle réfléchit sous l'incidence perpendiculaire, et son indice de réfraction.

En effet, en désignant par e' l'épaisseur d'air qui réfléchit la même teinte, et par e l'épaisseur cherchée, on a

$$e = e' \cdot \frac{n'}{n},$$

n' étant l'indice de réfraction de l'air, et n celui de la substance. Par exemple, si on prend une lame de mica assez mince pour réfléchir le bleu du 3e ordre, on aura, d'après la table précédente, $e' = 23,4$; et, comme pour l'indice de réfraction du mica on a

$$\frac{n}{n'} = 1,53,$$

il en résulte

$$e = \frac{23,4}{1,53} = 15,3.$$

1375. Les anneaux colorés qui se forment dans une lame d'air comprise entre deux prismes présentent un phénomène fort singulier en apparence, mais qui s'explique parfaitement au moyen de ce qui précède. Si l'on fait tourner les prismes de manière à rendre les rayons incidents de plus en plus obliques à la lame d'air, on voit les anneaux s'élargir de plus en plus autour de la tache centrale; mais les teintes qui les composent se rapprochent peu à peu, et on arrive à un terme où les couleurs ont disparu, alors on n'aperçoit que des anneaux blancs et noirs; en continuant le mouvement des prismes les teintes se reproduisent, mais dans un ordre inverse. Nous avons vu que, quand des rayons de différentes teintes tombent sur une lame d'air sous la même incidence, les diamètres des anneaux de même ordre vont en décroissant du rouge au violet. Ce parallélisme des rayons incidents a sensiblement lieu dans les lentilles d'un grand rayon : aussi, dans un même anneau, les couleurs ne sont point changées par l'inclinaison des rayons; mais il n'en est point ainsi quand les rayons arrivent à la lame d'air à travers un prisme dont l'angle réfringent est considérable. En effet, les rayons les plus réfrangibles s'inclinent plus que les autres sur la lame d'air; et, comme le diamètre des anneaux croît avec l'inclinaison, on conçoit qu'il existe une inclinaison des rayons émergents, pour laquelle les différences d'incidence des rayons rouge et violet compensent l'inégalité des anneaux qu'ils formeraient sous la même incidence : alors les anneaux extrêmes ont sensiblement le même diamètre, ainsi que les anneaux intermédiaires, et on ne doit apercevoir que des bandes blanches et noires. Mais, sous une plus grande inclinaison, l'influence de l'obliquité augmentant, les anneaux sont d'autant plus grands qu'ils sont plus réfrangibles; et alors la succession des teintes dans les anneaux doit être inverse de celle qui existait avant l'apparition des anneaux blancs.

1376. *Anneaux transmis.* Quant aux anneaux transmis, nous avons donné les lois des épaisseurs à leurs périmètres intérieurs et extérieurs, et il est évident qu'ils doivent être complémentaires des anneaux réfléchis; on doit à M. Arago une expérience qui démontre ce fait avec la dernière évidence. Voici en quoi elle consiste. On prend deux lentilles parfaitement égales, ayant mêmes courbures et mêmes épaisseurs; on les superpose et on les place horizontalement devant un mur blanc en plaçant l'œil convenablement, et disposant un diaphragme de manière à ne laisser arriver

Digitized by Google

successivement sur le système des verres que la lumière de la partie supérieure ou de la partie inférieure du mur : on aperçoit alors des anneaux réfléchis ou transmis ; mais, en ôtant le diaphragme de manière à éclairer le système des lentilles en dessus et en dessous, les anneaux disparaissent complétement. Ainsi la superposition des anneaux réfléchis et transmis forme de la lumière blanche.

1377. M. Arago a fondé sur ce principe un moyen bien plus exact que ceux qui étaient connus pour déterminer le rapport des intensités de deux lumières. Soient *AB* (*fig.* 847) un écran translucide, *CD* un écran opaque et noirci, *PQ* un système de deux lentilles égales, maintenu verticalement dans une position fixe de manière que la lame mince soit dans le prolongement de *CD;* supposons qu'on ait tracé sur le plan horizontal qui supporte les écrans *AB* et *CD* deux lignes *MY* et *MZ* passant par le centre de la lame mince et également inclinées sur *CD;* que ces lignes soient divisées en centimètres et en millimètres à partir du centre de la lame d'air : il est évident que, si l'œil est placé en *o* à la hauteur du centre de la lame mince, et si les lumières sont placées sur des verticales égales passant par *MY* et *MZ*, on verra deux systèmes d'anneaux superposés ; et, si on fait varier la distance d'une des lumières au point *M*, elle atteindra une position dans laquelle les deux systèmes d'anneaux disparaîtront complétement : alors les intensités des deux lumières seront évidemment dans le rapport inverse des carrés des distances au centre de la lame mince. Il est évident que cette méthode n'est applicable qu'à des lumières de même teinte : car, autrement, les anneaux ne disparaîtraient pas.

1378. *Anneaux multiples.* Lorsqu'on éclaire les plaques avec une bougie ou une lampe, et qu'on observe les anneaux sous une grande inclinaison, on aperçoit plusieurs systèmes d'anneaux placés les uns à côté des autres, dont les centres sont situés dans la direction du plan perpendiculaire aux lames qui passe par l'œil et par le point de contact des plaques. Ces anneaux proviennent des réflexions qu'éprouvent les rayons des premiers anneaux aux surfaces de la plaque supérieure; on observe en même temps des franges étroites très-faibles, qui traversent les anneaux.

1379. *Anneaux réfléchis à centre blanc.* Lorsqu'on forme des anneaux colorés avec une lame mince comprise entre deux corps, de manière que l'indice de la lame mince soit plus grand que celui de la lame supérieure et plus petit que celui de la lame inférieure, par exemple en plaçant de l'huile de girofle ou de sassafras entre une lame de crown-glass et une lame de flint-glass, ou entre une lame de spath-fluor et une lame de diamant, on obtient par réflexion des anneaux à centre blanc, comme ceux qui se produisent par transmission quand la lame mince a un indice plus grand ou plus petit que ceux des plaques entre lesquelles elle est interposée. C'est un phénomène extrêmement remarquable, et sur lequel nous reviendrons en parlant du système des ondulations.

1380. *Coloration de la lumière réfléchie par des plaques épaisses.* Newton ayant introduit un rayon solaire dans une chambre obscure, par un orifice circulaire d'une tiers de pouce de diamètre, il le fit tomber perpendiculairement sur un miroir de verre concave, dont les surfaces étaient concentriques : le rayon de la surface intérieure était d'environ six pieds, et la surface extérieure était étamée. Au centre de courbure du miroir, Newton plaça un carton blanc percé d'un très-petit trou pour laisser passer la lumière incidente : en regardant le carton il aperçut quatre ou cinq anneaux colorés concentriques qui environnaient l'orifice ; ces anneaux étaient disposés comme ceux qui s'observent par transmission à travers deux objectifs superposés ; les couleurs se succédaient dans le même ordre. En répétant l'expérience avec une lumière homogène, il se forma des anneaux concentriques alternativement noirs et de la couleur de la lumière. Une mesure exacte des diamètres des anneaux dans les

Digitized by Google

points les plus brillants fit reconnaître qu'ils suivaient les mêmes lois que ceux qui proviennent des lames minces par transmission : les carrés des diamètres des milieux des anneaux étaient entre eux comme la suite des nombres pairs 0, 2, 4, 6, etc., et les carrés des diamètres des anneaux obscurs suivaient au contraire la loi des nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc., et les valeurs absolues des diamètres des anneaux de même rang et de différentes couleurs étaient entre eux dans les mêmes rapports que dans les lames minces. Lorsqu'on inclinait le miroir, les anneaux restaient toujours concentriques à l'axe du miroir, et par conséquent se peignaient sur le carton à des distances de l'orifice d'autant plus grandes que le miroir avait été plus incliné.

Pour que cette expérience réussisse, il faut que le carton soit placé exactement au centre de courbure du miroir, car, lorsqu'on l'écarte de cette position, de manière à l'éloigner ou le rapprocher du miroir, les anneaux s'affaiblissent rapidement. Il faut aussi placer le carton le plus près possible de l'orifice du volet, afin que le point de divergence des rayons soit très-voisin du centre, parce qu'alors le faisceau réfléchi revient presque exactement à l'orifice du carton; si le point de divergence était éloigné, le faisceau réfléchi couvrirait une plus ou moins grande étendue du carton et ferait disparaître les anneaux.

Ces phénomènes se développent encore quand la seconde surface du miroir n'est point étamée; mais ils ne se produisent point quand on emploie des miroirs métalliques. Ainsi, l'apparition des anneaux semble dépendre des réflexions qui se font à la première et à la seconde surface du miroir. Lorsqu'on fait varier l'épaisseur du miroir, Newton a constaté que les diamètres des anneaux semblables étaient en raison inverse des carrés des épaisseurs.

Ces expériences peuvent être faites sur des miroirs dont les surfaces ne sont pas concentriques; mais il faut placer l'écran de manière que les rayons très-voisins de l'axe rencontrent perpendiculairement la seconde surface, car alors les rayons régulièrement réfléchis retournent par le même chemin : cette condition peut toujours être satisfaite. Mais quand les deux faces sont planes, les rayons incidents doivent être parallèles, et quand la seconde surface a un plus grand rayon de courbure que la première, sans lui être concentrique, le faisceau incident doit être convergent. Ces phénomènes ont été vérifiés en 1816 par MM. Biot et Pouillet. Le duc de Chaulnes a aussi remarqué que, si on couvrait la première surface du miroir avec un vernis très-léger, les anneaux devenaient beaucoup plus brillants. Le même physicien a aussi découvert que l'on pouvait produire des anneaux colorés avec un miroir métallique, en plaçant devant le miroir et sur le trajet des rayons directs une lame mince de verre ou de mica. Pour obtenir des anneaux distincts, il faut placer l'orifice du volet au centre de courbure du miroir, et l'écran contre le volet lui-même : les anneaux se dessinent nettement sur le carton, quelle que soit la distance de la lame mince au miroir; mais leur grandeur varie en sens contraire de cette distance. Ces dernières expériences ont également été vérifiées avec beaucoup de soin par MM. Biot et Pouillet. On peut obtenir des franges assez nettes en soufflant sur une glace étamée ordinaire éclairée par une bougie, et plaçant l'œil très-près de la bougie.

§ V. *Décomposition de la lumière dans son passage près des surfaces des corps (diffraction).*

1381. Les rayons de lumière qui rasent la surface des corps sont déviés de leur direction, et cette déviation, est accompagnée d'une décomposition analogue à celle que la lumière éprouve en traversant des lames minces. Ces modifications qu'éprouve la lumière portent en général le nom de *diffraction*. On peut observer des effets de

Digitized by Google

diffraction en regardant la flamme d'une bougie à travers une fente étroite percée dans une feuille de papier noir; on aperçoit de larges franges irisées qui environnent la flamme : elles sont beaucoup plus nettes lorsqu'on regarde la flamme à travers deux fentes parallèles très-écartées. En plaçant entre l'œil et la flamme d'une bougie éloignée un cheveu vertical très-près de l'œil, on voit de chaque côté de larges bandes colorées. Les phénomènes dont il est question ont été découverts par Grimaldi, et étudiés ensuite par Newton, le docteur Yong et Fresnel; mais c'est à ce dernier qu'on doit la découverte de leurs lois et leur explication. Pour l'instant nous nous bornerons à exposer les moyens d'observation et les lois des différentes classes de phénomènes dus à la diffraction.

1382. *Moyens d'observation.* Dans toutes les expériences de diffraction, il est important que le corps lumineux soit réduit à une bande très-étroite ou à un cercle d'un très-petit diamètre, parce que, chaque point lumineux produisant des franges qui dépendent de sa position, lorsque le corps lumineux a des dimensions qui ne sont pas très-petites, les franges résultant de ses différents points se détruisent ou du moins deviennent diffuses par leur superposition. Lorsqu'on emploie un corps lumineux ayant de grandes dimensions, on place devant un écran percé d'un très-petit orifice circulaire ou d'une fente longitudinale. Les effets sont les mêmes que si le corps lumineux avait les dimensions de l'orifice. On pourrait aussi placer devant le corps lumineux un écran garni d'une lentille sphérique ou cylindrique : tout se passerait comme si la lumière émanait directement du foyer, qui dans le premier cas est un petit cercle, et dans le second une bande très-étroite. Mais l'intensité de la lumière est sensiblement la même que si la lumière avait traversé des orifices ayant la forme des images focales, attendu qu'au delà du foyer la lumière se disperse dans une étendue angulaire d'autant plus grande que la distance focale est plus petite. Il est toujours avantageux d'opérer dans une chambre obscure.

On peut employer pour foyer de lumière un rayon solaire qui pénètre dans une chambre obscure après avoir été réfléchi par un héliostat; ou la flamme d'une lampe ordinaire; ou bien celle d'une lampe à hydrogène ou à alcool, en suspendant dans la flamme du papier imprégné d'une dissolution d'hydrochlorate de magnésie. On peut aussi se servir d'une lampe à alcool, dans laquelle on suspend verticalement un fil de platine : le fil acquiert un grand éclat, la lumière de la flamme devient insensible, et par conséquent on n'a pas besoin d'un écran pour réduire les dimensions du foyer de lumière. En plaçant le fil horizontalement et dans la direction de l'observateur, on obtient un point lumineux très-brillant. Pour obtenir des rayons de différentes teintes, on peut placer en un point quelconque du trajet des rayons, ou près de l'œil, un verre coloré de la teinte sur laquelle on veut opérer. Pour avoir plus de vivacité on peut aussi employer la lampe mono-chromatique.

Le faisceau de lumière émané du foyer, ainsi réduit presqu'à un point ou à une ligne lumineuse, est ensuite reçu sur un écran percé d'orifices de différentes formes, qu'on place à différentes distances. Ces orifices sont tantôt des fentes étroites, formées par deux plaques, dont l'une est mobile à l'aide de deux vis de rappel au moyen desquelles on peut faire varier la distance et l'inclinaison des bords voisins, et qui peut servir à mesurer la largeur de l'orifice; tantôt des orifices circulaires de différents diamètres; tantôt des orifices d'un grand diamètre traversés par des fils verticaux de différents diamètres; tantôt enfin des orifices d'un grand diamètre recouverts de plaques de verre sur lesquelles on a collé des disques opaques. Comme les apparences varient avec la distance de l'écran au foyer de lumière, il est utile de placer les écrans sur une règle horizontale fixe divisée, sur laquelle ils peuvent se mouvoir, et comme dans le cas où on emploie des fentes ou des fils, il est très-important que leur direc-

Digitized by Google

tion soit exactement celle du trait lumineux, il faut que l'écran mobile puisse prendre dans son plan différentes inclinaisons afin que l'on puisse établir le parallélisme en question.

C'est au delà de ce dernier écran que l'on observe les franges. Les franges pourraient être reçues sur un écran blanc et opaque, ou sur un verre légèrement dépoli placé en avant de l'œil ; on peut aussi les observer à l'œil nu. Mais il est plus avantageux de les regarder dans l'espace avec une loupe : les franges ainsi observées sont absolument semblables à celles qui se forment sur un verre dépoli, mais elles sont grossies et plus brillantes, et on les distingue dans une foule de circonstances où on ne pourrait pas les apercevoir sur un écran à cause de leur finesse et de la faiblesse de la lumière. Dans toutes les observations de franges à la loupe, il faut avoir soin de faire tomber le foyer lumineux de la lentille au milieu de la pupille, en la tenant à une distance telle que toute sa surface soit éclairée, et chercher dans l'espace les franges qu'on veut observer (Fresnel).

Pour mesurer les distances des franges, Fresnel se servait d'un appareil composé d'une plaque de cuivre mobile à frottement doux entre deux rainures fixes ; cette plaque était percée à son centre d'une ouverture d'un centimètre de diamètre, sur les bords de laquelle étaient fixés d'un côté un fil de soie écrue qui servait de point de mire, et de l'autre un petit tuyau qui portait la loupe que l'on pouvait éloigner ou rapprocher du fil jusqu'à ce qu'il se trouvât à son foyer ; la plaque était dirigée dans son mouvement par une vis micrométrique exécutée avec beaucoup de soin, et dont la hauteur du pas était connue exactement. Pour mesurer l'intervalle des milieux de deux bandes brillantes on amenait successivement le fil sur le milieu de la première bande et sur celui de la seconde, en prenant note chaque fois de la division du cadran à laquelle répondait l'aiguille et du nombre de tour que la vis avait exécutés.

1383. *Franges formées en dehors de l'ombre d'un corps.* Si on place le bord rectiligne d'un écran opaque dans la direction d'une fente traversée par un faisceau de lumière homogène, ou si la lumière étant quelconque, on regarde les franges avec un verre coloré, on remarque qu'il se forme en dehors de l'ombre des bandes alternativement obscures et colorées, qui se resserrent et s'affaiblissent à mesure qu'elles s'éloignent du bord de l'ombre géométrique, et si on mesure les distances de ces bandes au bord de l'ombre, à différentes distances de l'écran, on trouve qu'elles se propagent suivant des hyperboles (*fig.* 848) dont l'axe réel est la distance du point lumineux au bord de l'écran, le centre au milieu *o* de cette distance, et dont l'axe imaginaire est représenté, pour les bandes obscures successives relatives à une même teinte, par la racine carrée des quantités 0, d, $2d$, $3d$, $4d$, etc., et pour les bandes brillantes, par les racines carrées des quantités $1/2\ d$, $3/2\ d$, $5/2\ d$, $7/2\ d$, etc., d étant une quantité qui varie d'une teinte à une autre, suivant les mêmes rapports que les épaisseurs des lames d'air qui donnent les anneaux de même ordre dans les lames minces d'air ; pour chaque couleur, elle est égale au double de l'épaisseur d'air correspondante à l'anneau du premier ordre.

Dans les expériences dont nous venons de rapporter les résultats, on ne pouvait pas mesurer directement la distance du centre de chaque frange au bord de l'ombre géométrique, attendu que le bord de l'ombre apparente ne coïncide pas avec l'intersection du plan des franges avec un plan passant par la ligne lumineuse et le bord de l'écran ; mais Fresnel a calculé cette distance de la manière suivante. Il employait un écran terminé par deux bords parallèles suffisamment écartés, la moitié de la distance de deux franges symétriques donnant la distance de chacune d'elles au plan qui passait par le milieu de l'écran ; et comme on connaissait la largeur de l'écran et sa distance à la ligne lumineuse et au plan des franges, on en déduisait la largeur de l'ombre

Digitized by Google

géométrique de l'écran, et par suite, la distance de chaque frange à l'ombre géométrique de l'arête correspondante.

Il résulte de là qu'en désignant par k un nombre constant pour une bande brillante ou obscure d'une teinte quelconque, par A la distance du bord de l'écran à la ligne lumineuse, par y la distance du centre de la frange à l'ombre géométrique à une distance x de l'écran, on aura $A^2y^2 - kx^2 = -A^2k$. La nature et la forme de l'écran sont sans influence sur la forme et la courbure des lignes suivant lesquelles les franges se propagent.

Les bandes colorées formées par des rayons de différentes teintes étant inégalement espacées, on conçoit facilement que dans la lumière blanche elles se superposeront en partie et produiront des teintes variées.

1384. *Franges produites par une ouverture très-étroite.* Lorsqu'une lumière homogène passe successivement à travers deux fentes très-fines parallèles (*fig.* 849), les franges d'une même teinte se propagent sensiblement suivant des lignes droites qui passent par le centre de l'orifice AB; toutes les bandes brillantes et obscures ont la même largeur, et cette largeur est proportionnelle à la distance à la fente.

Les distances des centres des bandes brillantes à l'axe du faisceau croissent comme les quantités $\frac{d}{2v}$, $\frac{3d}{2v}$, $\frac{5d}{2v}$, $\frac{7d}{2v}$, etc.; les distances des centres des bandes obscures varient comme les quantités $\frac{d}{v}$, $\frac{2d}{v}$, $\frac{3d}{v}$, etc., v étant la largeur de la fente, et d une quantité constante pour le même rayon lumineux et égale au double de l'épaisseur de la lame d'air correspondante au milieu de la largeur de l'anneau réfléchi du premier ordre. Ainsi les largeurs des franges sont en raison inverse de la largeur de l'orifice.

1385. *Franges produites par deux fentes étroites parallèles et très-voisines.* Les franges se propagent suivant des nappes hyperboliques dont les foyers sont sur les deux fentes lumineuses (*fig.* 850). Les franges brillantes et obscures ont sensiblement la même largeur; pour toutes les teintes, elles sont en raison inverse des distances des fentes entre elles. A une même distance des fentes, les distances des centres des franges brillantes à l'axe du faisceau varient comme les nombres d, $3d$, $5d$, $7d$, etc., et les centres des bandes obscures comme les nombres 0, $2d$, $4d$, $6d$, etc., d ayant la même valeur que précédemment.

Si la fente était formée par deux lignes inclinées, les franges reçues sur un plan parallèle à la fente iraient en s'écartant les unes des autres, à mesure qu'elles se rapprocheraient de la partie la plus étroite de la fente. C'est une conséquence évidente de la loi relative à l'influence de la largeur de la fente.

1386. Indépendamment du système de franges dont nous venons de parler, chaque fente produit encore des franges comme si elle existait seule; mais ces dernières sont très-faibles, surtout vers la partie centrale du faisceau, où les franges résultant des deux faisceaux sont si brillantes. Quand on éloigne progressivement les deux fentes, les franges centrales se resserrent, s'affaiblissent, et finissent bientôt par disparaître, pour ne laisser subsister que celles qui résultent de chaque fente. Si on élargit les fentes, ces deux systèmes de franges s'affaiblissent rapidement, et il se forme alors quatre nouveaux systèmes de franges identiques avec celles qui naissent du bord d'un écran indéfini dans un sens.

1387. Les franges qui se forment symétriquement autour de l'axe du faisceau résultent de l'influence des deux faisceaux de rayons qui passent par les deux fentes : car, si on bouche une des fentes avec un écran opaque, elles disparaissent. Si on considère un point d'une frange obscure, la suppression d'un des deux faisceaux

Digitized by Google

rend ce point moins sombre : ainsi un même point éclairé par deux faisceaux de lumière peut être plus sombre que quand il est éclairé par un seul. Si on place une lame de verre ou d'un corps transparent quelconque sur une des fentes, si la lame a une épaisseur qui dépasse 1/10 de millimètre, les franges disparaissent comme si l'écran était opaque, tandis qu'elles ne changent pas si les deux fentes sont couvertes en même temps par le même écran transparent. Enfin, si on recouvre une seule fente avec une lame transparente très-mince, par exemple avec une lame mince de mica, les franges subsistent, mais elles sont déplacées : le centre du système de franges se porte du côté de la lame mince, et d'autant plus que cette lame a une plus grande épaisseur.

1388. On peut obtenir les franges qui résultent de l'influence de deux faisceaux lumineux très-peu inclinés l'un sur l'autre par un procédé différent qu'il est bon de connaître. On prend un prisme de verre *ABC* (*fig.* 851 *A*) dont l'angle *A* diffère très-peu de 180°, et on l'éclaire par une fente étroite parallèle aux arêtes. La lumière, après avoir traversé le prisme, se dévie vers l'arête *A*, et les faisceaux se comportent comme s'ils partaient de deux points *P* et *P'* très-rapprochés. Comme il faut que la convergence des deux faisceaux soit très-petite, les angles en *B* et *C* doivent être très-petits; on peut d'ailleurs diminuer la convergence des rayons pour un prisme donné, en le plaçant dans un vase plein d'eau terminé par deux glaces parallèles.

1389. *Franges produites par un corps très-étroit.* Lorsqu'un faisceau de lumière traversant une fente très-étroite rencontre ensuite un corps très-mince, tel qu'un fil métallique, un cheveu, l'ombre ne se propage pas en ligne droite, mais en suivant une courbe hyperbolique, comme les franges formées par le bord d'un écran (1383). Par exemple, d'après Newton, un cheveu de 1/280 de pouce de diamètre, placé a 12 pieds du point lumineux, projetait à 4 pouces une ombre de 1/60 de pouce, plus de quatre fois le diamètre du cheveu; à 2 pieds une ombre égale à 1/28 de pouce, ou onze fois le diamètre du cheveu; à 10 pieds une ombre égale à 1/8 de pouce, trente-cinq fois plus grande que le diamètre du cheveu; tandis que, si la direction de l'ombre eût été rectiligne, l'écran aurait dû être placé à 420 pieds du point lumineux pour que le diamètre de l'ombre fût égal à trente-cinq fois celui du cheveu.

Il se forme en même temps des franges intérieures et extérieures : pour les franges intérieures qui sont suffisamment éloignées des bords de l'ombre, elles sont les mêmes que celles qui proviendraient de deux fentes étroites distantes de l'épaisseur du corps; et pour les franges extérieures, elles diffèrent peu de celles qui se produiraient si on supposait successivement le corps indéfiniment prolongé à droite et à gauche. Les franges se propagent alors comme l'indique la fig. 851*A*; mais les franges intérieures sortent de l'ombre, et viennent se mêler avec les franges extérieures.

On peut très-facilement découvrir les franges formées dans la lumière d'une étoile un peu brillante par l'interposition d'un corps opaque, et même celle qui se forme dans son ombre s'il est assez étroit et assez éloigné du spectateur; mais il faut employer une loupe d'un foyer assez long, de 2 pieds par exemple, parce que, si le verre était plus convexe, la lumière serait trop affaiblie.

1390. *Anneaux produits par un orifice circulaire.* Si on fait passer la lumière d'un point lumineux par un orifice circulaire d'un très-petit diamètre, le centre de la projection de l'orifice est alternativement obscur et coloré lorsqu'on observe à des distances croissantes, et il se forme des franges dans la partie éclairée de l'image et dans l'ombre.

1391. *Anneaux produits dans l'ombre d'un écran circulaire.* Le faisceau de lumière traversant toujours un orifice circulaire d'un très-petit diamètre, si on reçoit

Digitized by Google

le faisceau de lumière sur une plaque de verre où l'on a collé un petit disque métallique arrondi au tour, on aperçoit des anneaux intérieurs et extérieurs, et le centre de l'ombre est aussi éclairé que si l'écran n'existait pas; ce centre brillant a une étendue d'autant plus grande que le disque a un plus petit diamètre, et qu'on observe son ombre à une plus grande distance. Lorsque le disque a seulement 3 ou 4 millimètres, on ne voit qu'un point lumineux lors même qu'on est éloigné d'un mètre, et qu'on se sert d'une forte loupe.

1392. *Franges par réflexion.* Les surfaces polies éclairées par un point lumineux présentent des phénomènes tout à fait semblables à ceux qu'on observe dans la lumière directe. Le champ lumineux réfléchi par le miroir est bordé de franges pareilles à celles qui entourent les ombres des corps. Quand la surface est très-étroite, ou qu'on la noircit en y conservant seulement une ligne brillante, on reproduit les phénomènes singuliers d'un faisceau de lumière qui traverse une fente étroite; deux lignes brillantes suffisamment rapprochées, sur la surface d'un miroir noirci dans le reste de son étendue, font naître les mêmes franges que deux fentes pareilles dans un écran. Si, au lieu de noircir une grande partie de la surface réfléchissante, on n'y trace au contraire qu'une ligne noire d'une largeur peu considérable, elle produira des franges semblables à celles qu'on observe dans l'ombre d'un corps étroit; enfin, les phénomènes se passent exactement comme si, la surface du miroir étant transparente, les rayons émanaient réellement de l'image du point lumineux.

1393. *Franges produites par les réseaux.* Les phénomènes curieux dont nous allons parler ont été observés pour la première fois par Frauenhoffer, le même physicien auquel on doit la découverte si importante des raies du spectre. Les réseaux sont toujours formés d'une série d'intervalles égaux alternativement opaques et transparents, ou ternes et réflecteurs, suivant que les observations doivent être faites par transmission ou par réflexion. On obtient les premiers en traçant sur une lame de verre, à l'aide d'un diamant, des traits parallèles très-rapprochés, ou en collant sur le verre une feuille d'or très-mince et enlevant des lames de métal très-étroites, à l'aide d'une pointe fine; on peut encore obtenir des réseaux de même nature en enroulant des fils métalliques très-fins ou des cheveux sur deux vis fixes, parallèles, à filets très-fins. Les réseaux de seconde espèce s'obtiennent en traçant sur une plaque métallique polie des raies parallèles. Dans tous les cas, les raies doivent être assez rapprochées pour qu'il y en ait au moins 30 dans un millimètre.

On construit facilement des réseaux au moyen de la machine à diviser les lignes droites (6). Pour tracer des réseaux sur le verre, il faut avoir des pointes de diamant très-fines, ce qu'on rencontre assez difficilement. On est parvenu à tracer sur le verre des réseaux renfermant plus de 400 traits par millimètre. Voici maintenant les phénomènes singuliers que produisent les réseaux.

1394. Supposons qu'un faisceau de lumière blanche pénètre dans une chambre obscure par une fente verticale très-étroite, et qu'à une petite distance de l'orifice, on place un réseau à raies verticales : le faisceau de lumière blanche, après avoir traversé le réseau, ira former, sur un écran placé derrière, l'image représentée par la fig. 852; au centre se trouve une image blanche de la fente, dont les bords sont parfaitement tranchés, comme si le réseau n'existait pas, et de chaque côté les apparences sont exactement symétriques.

L'espace noir *B* est suivi du spectre *C*, ayant le violet au dedans et le rouge au dehors; ce spectre est suivi d'un nouvel espace noir *D* au delà duquel se trouve une série de spectres, ayant tous le violet au dedans et qui se superposent en partie; lorsque les spectres sont assez brillants et assez étendus, on y distingue les mêmes raies que dans les spectres formés par réfraction. Mais les mêmes raies ne sont pas à

Digitized by Google

égales distances dans les différents spectres; en désignant par 1 la distance de deux raies dans le premier spectre, cette distance est 2 dans le second, 3 dans le troisième, etc. Dans les spectres produits par les réseaux, non-seulement les bandes colorées sont disposées dans le même ordre, mais leurs largeurs relatives sont les mêmes; circonstances qui n'existent pas dans les spectres formés par réfraction.

Frauenhoffer a en outre constaté par de nombreuses expériences : 1° que la déviation des franges de même teinte sur l'axe du faisceau était proportionnelle au rang de ces franges, ou à celui des spectres dont elles font partie; 2° que la déviation d'une même frange est en raison inverse de la somme faite de la largeur d'une raie obscure et d'une raie transparente, de sorte qu'en désignant par d la déviation de la frange du 1er ordre d'une certaine couleur, par s la somme des largeurs d'une raie obscure et d'une raie transparente, par k un coefficient constant, et par D la déviation de la frange de l'ordre n, on a $d = k : s$ et $D = nd$; 3° enfin que, si l'une des raies obscure ou transparente est égale à $\frac{1}{n}$ de la somme des largeurs des deux raies, le spectre de l'ordre n disparaît.

1395. Nous avons dit que l'on recevait l'image sur un écran; cette méthode est suffisante tant qu'il ne s'agit que de reconnaître l'ensemble des phénomènes; mais pour apercevoir les raies des différents spectres et pour mesurer leurs distances, il faut observer les spectres avec une lunette. Frauenhoffer se servait de l'appareil fig. 853 : *ABCD* est un cercle divisé, fixé horizontalement, dont le limbe peut être parcouru par une alidade portant une lunette dont le foyer est traversé par un fil vertical; au centre du cercle est placé le réseau qui reçoit le faisceau de lumière. En faisant mouvoir la lunette de manière à faire coïncider le fil avec une raie quelconque d'un des spectres, on obtient immédiatement l'angle du faisceau élémentaire suivant lequel la raie se propage, avec l'axe du faisceau. On pourrait aussi employer le micromètre de Fresnel décrit précédemment.

Cette déviation étant assez petite, on peut la mesurer avec une approximation suffisante par plusieurs moyens qui n'exigent pas d'appareils si parfaits. Nous les décrirons avec détail, parce que la déviation se trouve liée à d'autres éléments qui peuvent facilement s'en déduire.

La première méthode est celle de M. Babinet : elle consiste à éclairer le réseau par deux bougies, au devant desquelles se trouvent deux fentes ayant à peu près un millimètre de largeur : l'œil étant placé très-près du réseau apercevra les deux fentes éclairées, et, de chaque côté, deux systèmes de franges qui se superposeront. Si nous supposons que les franges soient observées avec un verre coloré, et que l'une des fentes soient un peu plus élevée que l'autre, les deux systèmes de franges ne se superposeront que dans une partie de leur hauteur, et on pourra facilement distinguer les ordres des bandes qui coïncideront; et, en faisant varier la distance du réseau à la plaque qui renferme les deux fentes, on pourra établir la coïncidence entre des bandes colorées d'un ordre quelconque; par conséquent, on pourra faire tomber les franges du troisième ordre de chacun des systèmes sur le centre de l'autre. Il est évident qu'alors en désignant par d la déviation de la frange du premier ordre, l'angle formé par les deux rayons visuels qui aboutissent aux milieux des deux orifices est égal à $3d$; en désignant par l la distance du réseau à la plaque et par i l'intervalle des fentes, en prenant la tangente pour l'angle, on aura $3d = 2i : l$, d'où $d = 2i : 3l$. Mais comme il serait difficile de bien apprécier la coïncidence du centre d'une frange avec le milieu de la fente, il est plus avantageux d'établir la coïncidence avec la frange du premier ordre de l'un des faisceaux en dedans de l'intervalle des deux centres : alors en désignant par n l'ordre de la frange, l'angle sous-tendu par la dis-

Digitized by Google

tance des deux fentes est $(n+1)d$, et on a $(n+1)d = 2i : l$, d'où $d = 2i : l(n+1)$. Ces expériences peuvent se faire facilement au moyen d'une règle de bois ayant un mètre de longueur, deux centimètres de largeur, cinq de hauteur, fixée horizontalement de champ, divisée dans toute sa longueur et portant des pièces de cuivre mobiles, sur lesquelles on fixe les écrans. Cette méthode exige évidemment une très-grande précision dans l'estimation de la mesure de la distance des milieux des deux fentes.

On pourrait aussi déterminer la déviation d en n'employant qu'un seul orifice. On placerait en avant du réseau un écran percé d'une fenêtre rectangulaire dont la largeur serait bien connue, et on le ferait mouvoir jusqu'à ce que les arêtes verticales passent par les milieux des franges de l'ordre n : en désignant par l la distance au réseau, par i la largeur de l'orifice, on aurait évidemment $2nd = i : l$ ou $d = i : 2\,ln$.

1396. Si le réseau, au lieu d'être formé de raies parallèles, était formé de cercles concentriques également espacés, et s'il était éclairé par un orifice circulaire, l'œil étant placé sous la ligne qui joint le centre des cercles avec le centre de l'orifice, on apercevrait une série d'anneaux concentriques, dont les distances au centre seraient les mêmes que les distances des franges à l'axe dans le cas des réseaux ordinaires.

Les reflets irisés de la nacre de perle, ainsi que ceux des plumes de certains oiseaux, sont dus à des réseaux. Dans la nacre de perle, M. Brewster l'a démontré en prenant l'empreinte de la surface de la nacre polie sur du mastic ou un alliage fusible à une basse température : l'empreinte produit les mêmes phénomènes de couleurs. Les réseaux paraissent dus à la structure feuillée de la nacre. On a imaginé en Angleterre de faire des bijoux dont les surfaces étaient couvertes de réseaux très-fins, obtenus par la compression sur un réseau tracé sur de l'acier trempé : ces bijoux, à la lumière du soleil ou des bougies, réfléchissent les couleurs les plus brillantes.

1397. *Effets produits par des poudres étalées sur une lame de verre, ou des fibres très-déliées groupées confusément.* Si après avoir humecté légèrement avec l'haleine une lame de verre, on y verse de la poudre de lycopode, une couche très-mince de cette poudre restera adhérente au verre, et si on place la lame de verre entre l'œil et la flamme d'une bougie, on apercevra de grands anneaux colorés, qui sont assez nettement terminés : ces anneaux sont beaucoup plus réguliers quand le faisceau de lumière provient de la flamme d'une lampe devant laquelle on a placé un écran percé d'un orifice circulaire de un à trois millimètres de diamètre. Les mêmes phénomènes sont produits par une lame de verre légèrement dépolie, par les petits globules d'eau que l'haleine dépose sur le verre, ou par des poils très-fins, tels que ceux de lièvre, etc., placés entre deux lames de verre. M. Delezene, qui a fait beaucoup d'expériences sur ces anneaux, a reconnu que leur formation dépendait beaucoup plus de l'égalité des petits corps placés les uns à côté des autres que de leur petitesse, et que les anneaux qui se forment dans la lumière homogène suivaient exactement les mêmes lois que les franges formées par des réseaux à raies parallèles. Les diamètres des anneaux d'une même teinte sont proportionnels à leur ordre.

Ces phénomènes se conçoivent facilement quand la poudre étalée sur le verre est formée de grains sensiblement de même grosseur et en contact : car dans la direction de chaque ligne tracée sur le verre à partir du centre du faisceau de lumière, les intervalles obscurs étant égaux ainsi que les intervalles transparents, il doit se former des anneaux colorés comme dans les réseaux circulaires ; mais comme cette égalité des petits grains n'est jamais parfaite, que leur distribution est toujours plus ou moins irrégulière, les anneaux ne doivent jamais avoir la netteté de ceux qui sont formés par des réseaux circulaires.

1398. Yong, qui a beaucoup observé ces phénomènes, avait supposé que les

Digitized by Google

diamètres des anneaux d'une même teinte et d'un même ordre étaient proportionnels aux diamètres des globules ou des fibres, et il avait construit d'après cela un instrument auquel il avait donné le nom d'*Ériomètre*, au moyen duquel on pouvait déterminer le rapport des diamètres des grains de poudre très-fins ou des poils des animaux. L'appareil est disposé de manière à observer dans chaque cas le diamètre d'un anneau coloré de même ordre : il se compose d'une règle horizontale divisée, sur laquelle glissent trois pièces mobiles; l'une porte un écran percé d'un petit trou où l'on place l'œil; le second porte un diaphragme percé d'une large fente verticale à travers laquelle on aperçoit une partie de tous les anneaux, et autour de son centre une série de petits orifices disposés circulairement; enfin le dernier porte la plaque de verre sur laquelle la poudre est étalée, ou les plaques qui renferment les fibres. On éclaire le corps comme nous l'avons dit précédemment, et on fait mouvoir le second diaphragme de manière que le même anneau coïncide avec les orifices disposés circulairement: il est évident que, désignant par l et l' les distances du second diaphragme à l'œil, lorsque cette condition a été remplie pour deux substances différentes, et pour un anneau de même teinte et de même ordre, on a $d : d' :: l' : l$.

Mais ce mode d'expériences supposait deux choses : 1° que les anneaux suivaient exactement les lois des franges des réseaux ; 2° que dans les effets produits par les poudres et les filaments, le rapport entre les parties opaques et transparentes était toujours le même, car les diamètres des anneaux sont seulement proportionnels à la somme de ces intervalles.

Nous avons déjà dit que M. Delezene avait reconnu que les anneaux suivaient exactement les mêmes lois que les réseaux. Quant à la dernière supposition, voici comment elle a été vérifiée par le même physicien. En prenant les précautions convenables pour obtenir de la poudre de lycopode à grains bien égaux, on ne peut jamais produire le cinquième anneau rouge, quoique le quatrième dans certaines circonstances ait une intensité qui ne permette pas de supposer que l'anneau suivant disparaisse par sa faible intensité : alors la cause de sa disparition provenait de ce que les intervalles transparents étaient précisément 1/5 des intervalles obscurs. Pour vérifier cette conjecture, il fallait déduire de la déviation la somme d'un intervalle obscur et transparent, puis le diamètre des globules de lycopode, et vérifier si le diamètre des globules ainsi obtenu coïncidait avec des mesures prises directement au moyen d'un microscope portant un micromètre au foyer de l'oculaire. Le diamètre du globule déduit de la déviation est $0^{mm},0272$ et le diamètre trouvé directement par l'observation est $0^{mm},0276$. La même expérience faite sur du poil de lièvre a donné les mêmes résultats. Par ces deux méthodes différentes on a obtenu $0^{mm},01404$ et $0^{mm},01413$.

C'est une chose bien singulière que le rapport entre les espaces obscurs et transparents des réseaux qui produiraient le même effet soit toujours 5, quelle que soit la forme globuleuse ou filamenteuse des petits corps réunis.

1399. *Effets produits par des réseaux croisés.* En superposant deux réseaux à raies parallèles égaux de manière que les raies se coupent à angle droit, on obtient un réseau à mailles carrées; en observant à l'aide de ce réseau un orifice éclairé, on aperçoit un grand nombre de spectres régulièrement distribués. Les réseaux à mailles rondes donnent naissance à des apparences analogues. Ces phénomènes n'ont point encore été étudiés.

1400. *Effets singuliers produits dans les lunettes.* On doit au célèbre astronome W. Herschell la connaissance de plusieurs phénomènes qui paraissent dépendre encore de la diffraction. Lorsqu'on regarde une étoile brillante avec une lunette dont le pouvoir amplifiant dépasse 200, l'étoile paraît parfaitement ronde, bien terminée, et entourée de plusieurs anneaux, alternativement obscurs et lucides, dont les bords

Digitized by Google

semblent légèrement colorés ; ces anneaux sont très-serrés et séparés par des intervalles égaux. Depuis, M. Arago a remarqué qu'en enfonçant graduellement l'oculaire dans la lunette, le centre du disque s'obscurcit de plus en plus et devient complétement noir; cette tache s'agrandit, et bientôt un point lumineux apparaît au centre; en continuant le mouvement de l'oculaire, cette tache blanche s'élargit, une nouvelle tache noire se forme au centre, et ainsi de suite, de sorte qu'il se forme autour du centre plusieurs anneaux alternativement obscurs et lumineux. Quand l'étoile est *scintillante* et que le centre du disque est occupé par une tache noire, on voit de temps à autre le centre devenir momentanément brillant.

Herschell fils a découvert que l'image d'une étoile était modifiée par la grandeur et la forme d'un diaphragme placé au devant de l'objectif : lorsque le diaphragme est circulaire, le disque et les anneaux s'élargissent en raison inverse du diamètre de l'orifice; lorsque le diaphragme est percé d'un orifice ayant la forme d'un triangle équilatéral, l'image circulaire est accompagnée de six rayons régulièrement placés; des orifices annulaires ou de toute autre forme donnent naissance à des apparences très-variées.

Toutes ces apparences singulières semblent résulter de l'interférence des rayons qui rasent les bords des orifices des diaphragmes; mais il y a une circonstance qui semble difficile à expliquer, c'est l'accroissement du diamètre de l'image à mesure que l'étoile est plus brillante.

§ VI. *Double réfraction.*

1401. Tous les cristaux transparents dont la forme primitive n'est ni un cube, ni un octaèdre régulier, ni un dodécaèdre rhomboïdal, jouissent de la propriété de donner deux images des objets vus à travers leur épaisseur; ce phénomène, qui indique que les rayons en pénétrant leur substance se divisent en deux parties, porte le nom de *double réfraction*. De toutes les substances connues, celle qui produit ce phénomène avec le plus d'énergie est la chaux carbonatée rhomboïdale (spath d'Islande). Comme d'ailleurs cette substance est assez répandue, nous nous en servirons pour décrire les phénomènes dont il s'agit.

1402. *Propriétés optiques de la chaux carbonatée.* Les cristaux de chaux carbonatée ont ordinairement la forme d'un prisme rhomboïdal (*fig.* 854) dont l'angle dièdre obtus est de 100°5'. Si on place un rhomboïde de chaux carbonatée sur un papier où l'on ait tracé des points et des lignes, en les regardant à travers le cristal on aperçoit deux images égales, de quelque manière que l'on place d'ailleurs le cristal. Il résulte de là que chaque rayon émané de chaque point des objets se divise en deux faisceaux distincts d'égale intensité. Une des deux images est plus déviée que l'autre et paraît plus rapprochée : cette dernière circonstance est une conséquence nécessaire de la première. En effet, nous rapportons toujours la position d'un point lumineux au sommet du cône de lumière qui a pour base l'ouverture de la pupille, et par conséquent le lieu d'une image est d'autant plus rapproché que les rayons reçus par l'œil sont plus divergents : or il est facile de voir que la divergence des rayons qui émergent d'un corps transparent croît avec la déviation. On peut aussi constater l'existence de ces faisceaux en faisant passer dans une chambre obscure un rayon solaire à travers le cristal : on obtient deux images sur un écran.

1403. Les deux systèmes de rayons qui produisent les deux images ne suivent pas les lois ordinaires de la réfraction. En effet, quand un point lumineux rayonne à travers une lame à faces parallèles, et que la position du point et de l'œil restent invariablement les mêmes, en faisant tourner la lame sur elle-même de manière que

Digitized by Google

ses faces restent toujours dans le même plan, l'image ne change pas de place; or, quand on fait cette expérience avec une lame de spath d'Islande, une des deux images seule reste immobile : cette dernière est donc formée par des rayons qui suivent les lois ordinaires de la réfraction, et l'autre par des rayons qui suivent d'autres lois. Ces lois diffèrent totalement des lois ordinaires, car les plans du rayon réfracté et du rayon incident ne coïncident que dans certaines circonstances, puisque, quand on fait tourner le cristal sur lui-même, une des deux images tourne autour de l'autre, et que sous l'incidence perpendiculaire les deux images subsistent. Pour cette raison, le premier a été désigné sous le nom de *rayon ordinaire,* et l'autre sous celui de *rayon extraordinaire.*

1404. L'inégalité de puissance réfractive des deux rayons explique un phénomène très-curieux. Si on regarde un point lumineux à travers un rhomboïde de spath d'Islande, on verra deux images; et si on avance une carte derrière le prisme, l'image la plus éloignée du bord de la carte sera la première à disparaître. Pour expliquer ce fait, soit *o* un point lumineux placé au-dessous d'un prisme de chaux carbonatée *ABCD* (*fig.* 855), ce point envoie des rayons sur toute la surface *BC* du prisme; soit *oa* le rayon incident dont le rayon réfracté ordinaire arrive à l'œil, que nous supposerons en *c*, le rayon extraordinaire correspondant au rayon *oa* prendra la direction *ab'*, sortira suivant *b'c'*, et par conséquent ne passera pas par l'œil; et il est évident qu'il en sera de même de tous les rayons extraordinaires correspondants à des rayons incidents qui rencontreront la surface *BC* entre *a* et *C;* mais il existera toujours un rayon incident *oc* dont le rayon réfracté extraordinaire ira passer par le point *c*. Ainsi les faisceaux émergents qui produisent les deux images proviennent de deux faisceaux incidents distincts (*fig.* 856) qui se croisent dans l'intérieur du cristal, en éprouvant l'un la réfraction ordinaire, l'autre la réfraction extraordinaire : alors, à l'inspection de la position des deux faisceaux incidents et des images correspondantes, on voit facilement la cause du phénomène en question.

1405. Malus a imaginé un moyen très-simple pour déterminer les positions des rayons réfractés ordinaires et extraordinaires, correspondant à un rayon incident quelconque. Sur une plaque d'ivoire, on grave avec un trait fin et noir un triangle rectangle *ABC* (*fig.* 857) dont le côté *BC* soit, par exemple, un dixième de *AC;* en posant le rhomboïde sur la plaque d'ivoire, pour chaque position de l'œil, il se trouvera un point *F* dans lequel la ligne *A'C'*, image extraordinaire de *AC*, coupera l'hypoténuse *AB* de l'image ordinaire : donc, si l'on prend sur le côté *AC* une longueur $AF = A'F$, le point *F* sera celui dont l'image extraordinaire coïncide avec l'image ordinaire du point *F*, considéré comme appartenant à l'hypoténuse *AB*. Ainsi le rayon ordinaire parti du point *F* et le rayon extraordinaire parti du point *F'* se confondent après leur sortie, et ne donnent qu'un seul rayon émergent. Chacun des côtés *AB* et *AC* étant divisé en un grand nombre de parties égales, et la position des côtés du triangle étant connue par rapport aux arêtes du cristal, il ne restera plus pour construire les rayons réfractés et le rayon émergent qu'à tracer sur la surface supérieure du cristal le point commun d'émergence et la direction du rayon émergent. La méthode la plus simple consiste à observer les images à travers une lunette mobile autour d'un point dont la position est connue par rapport au cristal, et qui est garnie d'un limbe circulaire mobile autour d'un axe vertical : le cristal étant horizontal, l'angle d'émergence sera donné immédiatement par l'observation. On a trouvé ainsi que dans un cristal de chaux carbonatée, quand le rayon incident était normal, le rayon réfracté extraordinaire était dévié de 6°12'.

1406. Lorsqu'on fait tourner le cristal sur lui-même, la position de l'œil étant fixe, l'image ordinaire reste fixe, tandis que l'image extraordinaire change de place

Digitized by Google

sans jamais se confondre avec la première ; mais parmi toutes les positions possibles du cristal, il en est une pour laquelle le rayon réfracté extraordinaire se trouve comme le rayon réfracté ordinaire dans le plan d'incidence. Cette position est évidemment celle dans laquelle une ligne droite située dans un plan mené par l'œil perpendiculairement aux faces horizontales du cristal donne deux images situées sur le prolongement l'une de l'autre. En traçant sur un papier une ligne dont le prolongement irait passer par le pied de la perpendiculaire abaissée de l'œil sur le prolongement du papier, plaçant dessus un rhomboïde, et le faisant tourner sur lui-même jusqu'à ce que les deux images soient sur le prolongement l'une de l'autre, on trouve que cette circonstance a lieu quand le plan d'incidence divise en deux parties égales un des angles plans obtus ; ou, si le cristal a toutes ses arêtes égales, quand le plan d'incidence passe par les petites diagonales des faces opposées. Ce plan porte le nom de *section principale*.

1407. Dans la section principale (*fig.* 858) un rayon incident *NI* normal se divise en deux : l'un, ordinaire, traverse le cristal sans éprouver aucune déviation ; l'autre, extraordinaire, est dévié du côté du petit angle *B'*. Lorsque le rayon est oblique d'un côté ou de l'autre de la normale, le rayon extraordinaire est toujours dévié du même côté ; c'est ce qu'il est facile de reconnaître en regardant l'image d'un point, plaçant l'œil dans la section principale et lui donnant toutes les positions possibles : l'image extraordinaire est toujours placée du même côté de l'image ordinaire.

1408. Supposons maintenant qu'on coupe le cristal par deux plans perpendiculaires à la diagonale passant par les sommets des deux angles trièdres obtus du rhomboïde (*fig.* 859). Si un rayon pénètre dans le cristal perpendiculairement à sa face supérieure, on trouve que ce rayon le traverse sans se partager ni se dévier ; si le rayon est incliné, il se divise ; mais les rayons réfractés ordinaire et extraordinaire sont tous deux dans le plan d'incidence. Et si on suppose que le plan d'incidence tourne autour de la normale au point d'incidence, l'angle d'incidence restant constant, l'angle de réfraction ordinaire et celui de réfraction extraordinaire restent aussi constants. Ainsi, les rayons incidents formant un cône droit ayant pour axe la normale, les rayons réfractés ordinairement et extraordinairement forment également deux cônes droits ayant le même axe. Si on n'avait enlevé qu'un seul angle solide du cristal, un rayon incident normal entré par la face supérieure sortirait également sans se diviser. On pourrait aussi n'obtenir qu'une seule image dans un cristal où l'on n'aurait pas pratiqué les faces additionnelles dont nous venons de parler : il suffirait de faire varier la position du plan d'incidence et l'angle d'incidence de manière que le rayon réfracté ordinaire ait la direction de la petite diagonale du rhomboïde. Nous verrons plus tard que le rayon incident devrait être situé dans la section principale, et faire avec la normale un angle facile à déterminer. Cette circonstance est la seule pour laquelle un rayon incident ne donne qu'une seule image.

1409. Il suit de là que, quelle que soit la cause qui produit la division d'un rayon incident dans le cristal, cette cause agit symétriquement autour de la diagonale qui passe par les sommets des deux angles trièdres obtus du rhomboïde : c'est pour cette raison que l'on a désigné cette ligne sous le nom d'*axe du cristal*.

1410. Si on taille dans un cristal un prisme (*fig.* 860) dans lequel le côté *AA'* soit parallèle à l'axe, il est évident que, quand un rayon se présentera pour traverser ce prisme dans un plan perpendiculaire ou parallèle au côté *AA'*, c'est-à-dire à l'axe, les deux rayons réfractés seront tous deux renfermés dans le plan d'incidence, puisque dans l'un et l'autre cas l'axe est symétrique par rapport à ce plan.

En mesurant la déviation par le moyen que nous avons indiqué précédemment, on trouve que, dans le cas où le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe, le rapport du

Digitized by Google

sinus d'incidence au sinus de réfraction est constant pour le rayon extraordinaire comme pour le rayon ordinaire; mais ce rapport n'est pas le même pour les deux rayons. Ce rapport peut se déduire de ces expériences mêmes; mais on peut le trouver par un procédé analogue à celui que nous avons fait connaître pour déterminer l'indice de réfraction ordinaire des corps solides, en taillant un prisme parallèlement à l'axe : on peut alors déterminer en même temps les indices de réfraction ordinaire et extraordinaire.

En désignant par $1/e$ et par $1/o$ les indices de réfraction des rayons extraordinaires et des rayons ordinaires, Malus a trouvé que pour la chaux carbonatée on avait

$$e = 0{,}6741717 \text{ et } o = 0{,}6044871.$$

Cette loi conduit à une construction géométrique très-simple pour déterminer les deux rayons réfractés. Elle consiste à décrire autour du point d'incidence deux cercles concentriques ayant pour rayon l'unité divisée par l'indice de réfraction des rayons ordinaire et extraordinaire; à prendre, à partir du point d'incidence, sur la surface du cristal et dans le plan d'incidence, une distance égale à 1 : sin i, i étant l'angle d'incidence, et, par le point correspondant, à mener une tangente à chacun des cercles : les points de tangence appartiendront aux rayons réfractés.

En effet, soient NI (*fig.* 861) le rayon incident, IO le rayon réfracté ordinaire; du point I, comme centre, décrivons deux cercles avec des rayons égaux à o et à e, c'est-à-dire à l'unité divisée par l'indice de réfraction ordinaire et l'indice de réfraction extraordinaire; par le point O, intersection du premier cercle et du rayon ordinaire, menons une tangente OK au cercle, l'angle OKI sera égal à θ, et on aura

$$IK \sin\theta = IO = \frac{\sin\theta}{\sin i}, \text{ d'où } IK = \frac{1}{\sin i}.$$

Or, la valeur de IK, étant indépendante de l'indice, restera la même, quel que soit cet indice, et par conséquent la construction énoncée se trouve justifiée.

1411. Si maintenant on place le rayon incident dans un plan parallèle à l'axe, on trouve, comme cela devait être, que le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction pour le rayon ordinaire est un nombre constant; mais il n'en est plus de même pour le rayon réfracté extraordinairement. La loi donnée par l'expérience conduit encore cependant à une construction géométrique assez simple pour trouver la direction du rayon refracté. Autour du point I, comme centre (*fig.* 862), on décrit un cercle ayant pour rayon l'unité divisée par l'indice de réfraction des rayons ordinaires, que nous avons désigné par o; et sur le diamètre du cercle, comme axe, on décrit une ellipse dont l'autre axe est égal à l'unité divisée par l'indice des rayons extraordinaires, que nous avons aussi désigné par e; on trace le rayon ordinaire IO, la tangente OK et la tangente KE à l'ellipse; le point E appartient au rayon extraordinaire.

En désignant par θ_o et θ_e les angles de réfraction ordinaire et extraordinaire, on trouve, d'après l'expérience,

$$\tang\theta_e = \frac{o}{e}\tang\theta_o.$$

Digitized by Google

Pour la chaux carbonatée, e est $> o$: par conséquent le rayon extraordinaire *est plus rapproché de la normale que le rayon ordinaire.* C'est le contraire de ce que *nous avons trouvé* quand le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe.

Cette relation s'accorde parfaitement avec la construction indiquée : *car, dans l'ellipse, la* sous-tangente étant indépendante de l'axe perpendiculaire à la ligne sur laquelle on la mesure, les ordonnées des points O et E se confondent, et on a

$$\text{tang } DIO : \text{tang } DIE :: o : e \quad \text{ou} \quad \text{tang } \phi_o : \text{tang } \phi_e :: o : e.$$

Ainsi, dans tous les cas, le rayon ordinaire est donné par une tangente à un cercle décrit avec le rayon o; dans le premier cas le rayon extraordinaire est donné par une tangente menée par le même point de la surface du cristal à un cercle dont le rayon est e, et dans le second cas par une tangente à une ellipse dont les axes sont o et e. Mais ces deux constructions n'indiquent rien pour la détermination des rayons réfractés extraordinaires dans des plans d'incidence obliques à l'axe. Huyghens a été conduit par analogie à la construction suivante, qu'il a ensuite vérifiée par l'expérience.

1412. Soient NI (*fig.* 863) un rayon incident situé dans un plan quelconque; XY la surface du cristal, que nous supposerons d'abord parallèle à l'axe; par le point I on mène une droite MM' parallèle à l'axe, et on prend $IM = IM' = o$; sur la normale du point d'incidence, on prend $IP = IP' = e$; sur MM' et PP' comme axes on décrit une ellipse et on fait tourner cette ellipse autour de MM'; elle engendre un ellipsoïde de révolution. Cela posé, soit IK l'intersection du plan d'incidence avec la surface du cristal; sur cette droite on prend un point K tel que IK soit égal à l'unité divisée par le sinus de l'angle d'incidence; par le point K on mène dans le plan XY, TT' perpendiculaire à KI, et par la droite TT' on mène un plan tangent à l'ellipsoïde : le point de tangence appartient au rayon réfracté extraordinairement. Si sur MM' comme diamètre on construit une sphère, le point de contact avec la sphère d'un plan tangent mené par TT' sera évidemment un point du rayon ordinaire.

Il est facile de voir que cette solution générale s'accorde parfaitement avec les solutions particulières que nous avons données précédemment.

Cette construction s'applique également au cas où la surface du cristal sur laquelle se présente le rayon incident est disposée d'une manière quelconque par rapport à l'axe.

XY (*fig.* 864) représentant la surface d'incidence, NI le rayon incident, IK l'intersection du plan d'incidence avec la surface du cristal, par le point I on mènera une ligne MM' parallèle à l'axe, on prendra $IM = IM' = o$, et sur cette droite, comme axe, on décrira un ellipsoïde de révolution dont le rayon à l'équateur soit égal à e; le point K se déterminera comme précédemment; par ce point et dans le plan XY on mènera TT' perpendiculairement à IK, et le plan tangent à l'ellipsoïde mené par TT' déterminera sur la surface de révolution un point du rayon réfracté extraordinairement.

1413. Quant aux rayons émergents, celui qui correspond au rayon ordinaire s'obtiendrait comme si le milieu n'était par cristallisé; et celui qui correspond au rayon extraordinaire s'obtiendrait en traçant au point d'émergence comme centre l'ellipsoïde de révolution, menant un plan tangent à cette surface par le point où elle serait coupée par le rayon extraordinaire, et abaissant une perpendiculaire par le point d'émergence sur la trace de ce plan sur la face d'émergence; sa direction sera celle du plan normal qui contient le rayon émergent, et sa longueur sera $1 : \sin i$, i étant l'angle du rayon émergent avec la normale.

Digitized by Google

Cette élégante construction, comme nous l'avons déjà dit, a été découverte et vérifiée par Huyghens; depuis, Wollaston et Malus l'ont soumise à de nouvelles épreuves, et l'expérience a confirmé son exactitude.

1414. Dans ce qui précède, nous avons supposé que les rayons lumineux passaient du vide dans le cristal; ou du moins d'une substance peu réfringente dans le cristal. Dans le cas où le cristal est environné d'un milieu quelconque non cristallisé, tous les phénomènes sont encore les mêmes; seulement il faut à la place des indices de réfraction substituer le rapport des indices du second milieu à celui du premier.

Examinons maintenant ce qui arriverait si le milieu extérieur était lui-même cristallisé.

Il peut se présenter deux cas : ou le rayon qui se présente pour pénétrer dans le corps cristallisé est ordinaire, ou bien il est extraordinaire. S'il est ordinaire, tout se passera comme si le premier milieu n'était par cristallisé, et tout ce qui précède lui sera exactement applicable. Mais si le rayon est extraordinaire, on ne peut pas savoir ce qui arrivera sans avoir recours à l'observation; or l'expérience a appris que le rayon en pénétrant dans le second milieu se divise, donne naissance à deux rayons réfractés, l'un ordinaire l'autre extraordinaire, et ces deux rayons ont précisément la direction de ceux qui résulteraient de la réfraction du rayon ordinaire correspondant au rayon extraordinaire incident. Pour trouver la direction de ce rayon, il faudra faire la construction d'Huyghens relative au premier milieu; par le point d'intersection de l'ellipsoïde avec le rayon réfracté extraordinaire on mènera un plan tangent à cette surface, et par l'intersection du plan tangent avec la surface de séparation des deux milieux on mènera un plan tangent à la sphère : le point de contact appartiendra évidemment au rayon ordinaire correspondant.

1415. Lorsqu'un rayon ordinaire ou extraordinaire se réfléchit à la surface inférieure d'un cristal jouissant de la double réfraction, le rayon réfléchi, en rentrant dans le cristal, se comporte comme un rayon ordinaire qui pénètre dans le cristal sous une certaine incidence : par conséquent, il produit deux rayons qui rentrent dans le cristal; l'un est ordinaire, l'autre extraordinaire. Si le rayon incident est ordinaire, il produit d'abord un rayon réfléchi ordinaire pour lequel l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence; quant au rayon réfracté extraordinaire, on le trouvera facilement en cherchant le rayon extraordinaire qui accompagne le rayon ordinaire réfléchi, à l'aide du calcul ou de la construction que nous avons indiquée. Si le rayon incident est extraordinaire, il faudra chercher le rayon ordinaire correspondant, pour lequel on cherchera les deux rayons réfléchis, comme précédemment. Il suit de là que les rayons ordinaires et extraordinaires qui s'accompagnent dans l'incidence s'accompagnent encore après la réflexion.

1416. Si on voulait déterminer la limite à laquelle commence la réflexion totale pour les rayons ordinaires et pour les rayons extraordinaires, il faudrait pour un point de la surface d'émergence faire la construction d'Huyghens, et mener des plans tangents à la sphère et à l'ellipsoïde par toutes les tangentes d'un cercle tracé sur la surface d'émergence autour du point d'émergence avec un rayon égal à l'unité : car pour les limites correspondantes à un angle d'incidence droit on a

$$IK = \frac{1}{\sin \theta} = \frac{1}{1} = 1;$$

et joignant le point d'émergence avec tous les points de tangence, on formera deux cônes qui seront les limites cherchées : celui des rayons ordinaires sera évidemment droit, et aura pour axe la normale; l'autre sera oblique.

Digitized by Google

1417. Si un rayon, soit ordinaire, soit extraordinaire, se présentait *à la face d'émergence* sous un angle plus grand que l'angle limite, la construction *précédente* ne pourrait pas servir à déterminer les rayons réfléchis. Alors en admettant que les rayons réfléchis suivent toujours les mêmes lois avant et après la réflexion totale, on parviendrait dans tous les cas à déterminer la direction des rayons réfléchis, en supposant le cristal contigu à un milieu plus réfringent, parce qu'alors on pourrait toujours considérer les rayons réfléchis comme étant les rayons réfractés correspondants à un même rayon incident, et la construction précédente (1415) pourrait s'effectuer.

1418. *Double réfraction des autres cristaux.* Dans ce qui précède il n'a été question que de la chaux carbonatée; mais il existe un grand nombre de cristaux qui jouissent également de la propriété de donner deux images des objets qu'on voit au travers. Les cristaux biréfringents se divisent en deux classes : les uns, comme la chaux carbonatée, n'ont qu'une direction dans laquelle un rayon peut les traverser sans se diviser; les autres en ont deux. On les désigne sous les noms de cristaux à un axe et de cristaux à deux axes.

1419. Les cristaux à un axe jouissent tous des mêmes propriétés que la chaux carbonatée, et tout ce que nous avons dit de cette dernière substance leur est applicable. Mais il y en a dans lesquels le rayon extraordinaire s'écarte de l'axe du cristal comme dans la chaux carbonatée, et d'autres dans lesquels il se rapproche. Les derniers sont désignés sous le nom de cristaux attractifs ou positifs, les premiers sous celui de cristaux répulsifs ou négatifs. Ces dénominations proviennent de ce que, dans le système de l'émission, on suppose que la double réfraction résulte d'une force perpendiculaire à l'axe qui s'exerce sur certaines molécules seulement, et qui est tantôt attractive, tantôt répulsive.

1420. Dans les cristaux à deux axes, aucun des rayons ne suit la loi de Descartes. On peut constater ce fait en plaçant sur du papier une plaque de cristal à faces parallèles : lorsque l'œil est immobile et qu'on fait tourner la plaque sur elle-même, aucune des deux images ne reste fixe. Fresnel a démontré ce fait par une expérience plus décisive. Supposons qu'on réunisse plusieurs fragments d'une même substance taillés dans différents sens, et que la masse de ces fragments ait la forme d'un prisme, il est évident que, si un des deux rayons suit la loi de Descartes, la direction de ce rayon sera indépendante de la direction de l'axe dans chaque fragment, et par conséquent que l'image ordinaire d'une ligne droite vue à travers le prisme serait droite; or, d'après l'expérience, elle est brisée comme l'image extraordinaire.

Il y a cependant dans les cristaux à deux axes deux plans dans lesquels un des deux rayons suit la loi de Descartes; ces deux plans sont perpendiculaires à celui des deux axes, et divisent en deux parties égales les angles qu'ils forment entre eux.

Dans les cristaux à un axe, nous avons vu que tous les phénomènes se développaient symétriquement de part et d'autre de la section principale; la même symétrie se retrouve dans les cristaux à deux axes relativement aux plans perpendiculaires à celui des deux axes, et qui divisent leurs angles en deux parties égales.

1421. J. F. W. Herschell, fils du célèbre astronome, a reconnu que dans un même cristal jouissant de la double réfraction, les axes relatifs aux rayons simples sont distincts les uns des autres; dans les cristaux à deux axes les bisectrices des angles des axes de tous les rayons coïncident exactement.

1422. On parvient facilement à distinguer les cristaux à un axe des cristaux à deux axes par des phénomènes de couleur dont nous parlerons plus loin. En général, dans les cristaux à un axe, les faces du cristal primitif sont semblablement ou symétriquement placées par rapport à l'axe. Les formes primitives correspondantes aux cristaux à un axe sont le rhomboïde, le prisme hexaèdre régulier, l'octaèdre isocèle à base

Digitized by Google

carrée, et le prisme droit à base carrée. Toutes les autres formes ont deux axes ou n'exercent point la double réfraction. D'après M. Sorret, de Genève, dans les cristaux à deux axes le plan des deux axes est toujours disposé d'une manière symétrique par rapport aux faces de la forme primitive, et les axes sont placés dans ce plan de manière à faire des angles égaux avec ces faces.

TABLEAU DES CRISTAUX BIRÉFRINGENTS A UN SEUL AXE.

Positifs.

Zircon.
Quartz.
Tungstate de zinc.
Stanite.
Boracite.
Apophylite.
Sulfate de potasse et de fer.
Suracétate de cuivre et de chaux.
Hydrate de magnésie.
Glace.
Hyposulfate de chaux.
Dioptase.
Argent rouge.

Négatifs.

Carbonate de chaux.
Carbonate de chaux et de magnésie.
Carbonate de chaux et de fer.
Tourmaline.
Rubellite.
Cornidon.
Saphir.
Rubis.
Émeraude.
Beryl.
Apatite.
Idocrase.
Vernerite.
Mica.
Phosphate de plomb.
Phosphate de plomb arseniaté.
Hydrate de strontiane.
Arseniate de potasse.
Hydrochlorate de chaux.
Hydrochlorate de strontiane.
Sous-phosphate de potasse.
Sulfate de nickel et de cuivre.
Cinabre.
Mellite.
Molybdate de plomb.
Octohédrite
Prussiate de potasse.
Phosphate de chaux.
Arseniate de plomb.
Arseniate de cuivre.
Néphéline.

CRISTAUX A DEUX AXES.

Noms des substances.	Angle des axes.	
Sulfate de nickel (certains échantillons).	3°	0′
Sulfo-carbonate de plomb	»	»
Carbonate de strontiane.	6	56
Carbonate de baryte	»	»
Nitrate de potasse.	5	20
Mica (certains échantillons)	6	0
Talc	7	24
Perle.	11	28
Hydrate de baryte.	13	18
Mica (certains échantillons)	14	0
Arragonite	18	18
Prussiate de potasse	19	24
Mica (certains échatillons).	25	0
Cymophane.	27	51

Digitized by Google

Anhydrite	28°	7′
Borax	28	42
Mica { divers échantillons examinés par M. Biot	30	0
	31	0
	32	0
	34	0
	37	0
Apophylite	35	8
Sulfate de magnésie	37	24
Sulfate de baryte	37	42
Spermaceti (environ)	37	40
Borax natif	38	48
Nitrate de zinc	40	0
Stylbite	41	42
Sulfate de nickel	42	4
Carbonate d'ammoniaque	43	24
Sulfate de zinc	44	28
Anhydrite (examinée par M. Biot)	44	41
Mica	45	0
Lepidolite	45	0
Benzoate d'ammoniaque	45	8
Sulfate de soude et de magnésie	46	40
Sulfate d'ammoniaque	49	42
Topaze du Brésil	49 à 50	0
Sucre	50	0
Sulfate de strontiane	50	0
Sulfo-hydrochlorate de magnésie et de fer	51	16
Sulfate de magnésie et d'ammoniaque	51	22
Phosphate de soude	55	20
Comptonite	56	6
Sulfate de chaux	60	0
Oxynitrate d'argent	62	16
Iolite	62	50
Feldspath	63	0
Topaze (Aberdeeshire)	65	0
Sulfate de potasse	67	0
Carbonate de soude	70	1
Acétate de plomb	70	25
Acide citrique	70	29
Tartrate de potasse	71	20
Acide tartrique	79	0
Tartrate de potasse et de soude	80	0
Carbonate de potasse	80	30
Cyanite	81	48
Chlorate de potasse	82	0
Épidote	84	19
Hydro-chlorate de cuivre	84	30
Peridot	87	56
Acide succinique	90	0
Sulfate de fer	90	0

Rochon a fait une application très-remarquable de la double réfraction à la mesure du diamètre apparent des corps, ou à la détermination de leur distance quand on

Digitized by Google

connaît leur grandeur, ou de la grandeur quand on connaît leur distance. Voici le principe et la description de cet instrument.

1423. *Micromètre à double image.* Soient M et N (*fig.* 865) deux prismes égaux, de spath d'Islande, de quartz ou de toute autre substance jouissant de la double réfraction, mais à un seul axe; supposons que la face AB du prisme M soit perpendiculaire à l'axe, et que les faces BC, CD et BD du second prisme soient parallèles à l'axe : ces prismes étant appliqués l'un contre l'autre comme l'indique la figure, il est évident que, si un rayon de lumière parti du point L vient rencontrer la surface AB perpendiculairement à sa direction, le rayon pénétrera jusqu'à la surface de séparation des deux prismes sans éprouver ni déviation ni division, puisque l'axe de réfraction du premier prisme est perpendiculaire à la surface AB; mais au point d'incidence I' avec la surface du second prisme, comme l'axe est perpendiculaire au rayon lumineux, ce dernier se divisera en deux : le rayon ordinaire continuera sa route sans éprouver de déviation, puisque les deux prismes sont de la même substance, et le rayon extraordinaire sera dévié à gauche ou à droite, suivant la nature du cristal. L'œil ne pourrait pas recevoir les deux rayons émergents provenant d'un même rayon incident; mais il recevra, en même temps que le rayon direct LO, un rayon extraordinaire Oi'' provenant d'un autre rayon incident Li, et il apercevra deux images distinctes. Les deux images seront plus ou moins écartées l'une de l'autre, suivant que la double réfraction des deux prismes sera plus ou moins énergique, et que l'angle réfringent sera plus ou moins grand.

Cela posé, soit A (*fig.* 866) l'objectif d'une lunette dont l'axe optique prolongé rencontre un objet SS'; soient F et F' les foyers des rayons envoyés par les points S et S', de sorte que FF' est l'image de SS'; plaçons en avant de cette image le double prisme dont nous venons de parler : les rayons ordinaires feront toujours leur foyer en FF', et les rayons extraordinaires formeront une autre image ff' dont la distance à la première dépendra de la position du double prisme. En effet, l'angle Fcf est constant : par conséquent, à mesure que le double prisme s'approche de la lentille A, les deux images s'écartent, et quand il s'en éloigne, elles se rapprochent.

Lorsque FF' coïncide avec cc', les deux images se confondent : et, si l'angle de déviation du prisme est plus grand que le diamètre apparent de l'objet SS' vu du point A, il y a toujours une position du prisme (*fig.* 867) pour laquelle les deux images sont tangentes : dans ce cas, l'image ordinaire se trouve comprise dans l'angle de déviation $F'c'F$ du prisme. Il résulte de là qu'en mesurant la distance Fc, que nous désignerons par H, et connaissant l'angle de déviation V du prisme, ainsi que la distance focale F de l'objectif, on en déduira facilement le diamètre apparent x de l'objet, car on a évidemment $FF' = F \tang x$, $FF' = H \tang V$;

d'où $$\tang x = \frac{H}{F} \tang V.$$

Or, comme pour le même instrument F et V sont constants, il s'ensuit que la valeur de tang x est proportionnelle à H : ainsi on peut écrire $\tang x = KH$. La valeur de K peut se déduire de V et F, qu'on pourrait déterminer directement; mais il est beaucoup plus simple de trouver la valeur de K par l'expérience. Pour cela on commence par placer le prisme de manière que les deux images coïncident, ce qui a lieu quand FF' coïncide avec cc'; on marque cette position du prisme : c'est évidemment le point à partir duquel la distance H doit être comptée. Ensuite on observe un objet d'une grandeur connue placé aussi à une distance connue, et par conséquent dont il est facile de trouver directement le diamètre apparent; alors on met les deux images en contact, et on mesure la distance H, l'équation $\tang x = KH$ donne la

Digitized by Google

valeur de K. Alors, l'échelle étant divisée en millimètres, on pourra dans tous les cas déduire x de H et K. Mais la graduation de l'échelle se fait de manière à donner directement la tangente de l'angle sous-tendu par le diamètre apparent de l'objet; cette graduation se fait d'une manière très-simple. Supposons que le diamètre de l'objet observé sous-tende un angle de 20 minutes connu d'avance, on divisera H en 20 parties égales, et le reste de l'échelle en parties égales à celles-là : chaque division correspondra évidemment à des accroissements de l'angle visuel de 1′. Les échelles des micromètres à double image portent, à côté de l'échelle en minute, des nombres qui sont le quotient de l'unité par la tangente de l'angle correspondant : en désignant un de ces nombres par T, par D la distance de l'objet et par d son diamètre, on a évidemment $d = D : T$, et $D = dT$. Ainsi, pour obtenir le diamètre d'un objet, il faut diviser sa distance par le nombre de l'échelle correspondant, et pour obtenir sa distance il faut multiplier son diamètre par ce nombre. Ainsi, d'après la taille moyenne connue d'un homme, on trouvera facilement sa distance.

Dans ce qui précède, nous n'avons point parlé de l'oculaire; mais il est évident qu'il ne peut avoir aucune influence pour détruire le contact des deux images quand il existe, ou pour l'établir quand il n'existe pas. La figure 868 représente une coupe longitudinale et une coupe transversale de la lunette de Rochon.

L'angle V formé par les deux faisceaux à la sortie du prisme peut être déterminé directement : en effet désignons par a et b les indices de réfraction ordinaire et extraordinaire du cristal, par I l'angle d'incidence sur la face commune des deux prismes, par R l'angle de réfraction du rayon extraordinaire dans le prisme N, par I' l'angle d'incidence sur la face CD du second prisme, et enfin par A l'angle réfringent ABC ou BCD, nous aurons

$$\frac{\sin I}{\sin R} = \frac{b}{a}, \quad \frac{\sin V}{\sin I'} = b, \quad I = A \quad \text{et} \quad I' = R - A;$$

d'où l'on tire

$$\sin V = b \sin (R - A) \quad \text{et} \quad \sin R = \frac{a}{b} \sin A.$$

Dans le cristal de roche, la déviation est en sens contraire de celle de la figure, et on a

$$a = 1{,}5484,$$
$$b = 1{,}5582.$$

Ainsi on pourra trouver l'angle V quand l'angle A sera connu; c'est ainsi qu'on a formé le tableau suivant :

Valeurs de A.	Valeurs de V.
30°	19′ 30″.
40	28 20
50	40 »
60	57 40

On voit, d'après ce tableau, qu'avec un prisme dont l'angle réfringent est de 60°, on ne peut pas mesurer des angles plus grands que 1°.

1424. La lunette de Rochon, disposée comme nous venons de l'indiquer, renferme une imperfection assez grave : l'image extraordinaire, à cause de la déviation qu'elle éprouve, est toujours garnie latéralement de franges colorées, d'autant plus mar-

Digitized by Google

quées que le double prisme est plus rapproché de l'objectif; alors il est impossible de bien juger du contact des deux images, et on pourrait commettre de grandes erreurs en employant cet instrument à la détermination du diamètre apparent du soleil ou de la lune. M. Arago a fait disparaître complétement cet inconvénient en plaçant le double prisme entre l'oculaire et l'œil, et faisant varier le grossissement de la lunette : le prisme étant placé près de l'œil, la dispersion est insensible. Pour faire varier le grossissement, l'oculaire doit être formé de deux verres qu'on peut éloigner ou rapprocher, et pour chaque distance le grossissement, déterminé d'avance, est inscrit sur une échelle latérale parcourue par un index entraîné par la lentille mobile. Il est facile de voir qu'en désignant le grossissement par G, et conservant les notations précédentes, on aura

$$V = Gx, \quad \text{d'où} \quad x = V : G;$$

ainsi, quand on connaîtra V et G, on en déduira x.

1425. M. Arago a employé d'une manière très-ingénieuse les doubles prismes dont nous venons de parler pour obtenir le grossissement dans tous les instruments d'optique. Ce procédé consiste à prendre un double prisme de cristal de roche tel que nous l'avons décrit; on le place devant l'oculaire de l'instrument, et on regarde une mire circulaire éloignée, et d'un diamètre connu : on aperçoit deux images distinctes. Alors on s'approche ou on s'éloigne de la mire jusqu'à ce que les deux images soient tangentes : dans cette position, les rayons partis des extrémités de l'objet sortent de l'instrument en faisant un angle égal à l'angle de déviation du prisme. Cet angle étant connu, il ne restera plus qu'à le diviser par le diamètre apparent de l'objet vu à l'œil nu pour avoir le grossissement.

1426. L'application de cette méthode à la mesure du grossissement des microscopes exige quelques détails. On commence par placer le double prisme sur l'oculaire, et on dispose, à la distance convenable de l'objectif, une plaque de verre sur laquelle on a tracé des lignes parallèles et également distantes, ce qu'on nomme un *micromètre objectif*. En regardant à travers le double prisme et l'instrument, on observe le nombre des divisions dont une des deux images dépasse l'autre. Supposons que cette longueur soit m millimètres, m sera évidemment le diamètre en millimètres d'un objet qui, à la distance D de la vision distincte, serait vu sous l'angle V de déviation du double prisme; mais à l'œil nu le diamètre d'un objet qui serait vu sous l'angle V à la distance D serait $D \tan V : m$ ainsi le grossissement sera égal à $D \tan V : m$.

§ VII. *Polarisation.*

1427. Jusqu'ici nous avons vu les rayons de lumière conserver les mêmes propriétés autour de l'axe du rayon : ainsi, quand on présente une surface plane obliquement à un rayon de lumière, et qu'on fait tourner la plaque autour de l'axe du faisceau de manière qu'il reste toujours également incliné sur lui, la quantité de lumière réfléchie reste constante, et il en est de même de la lumière réfractée. Mais, dans certaines circonstances, les rayons de lumière acquièrent la singulière propriété de cesser d'être également réfléchis sous un même angle d'incidence sur un même corps suivant les côtés de leur axe qui se trouvent dans le plan d'incidence; il arrive même alors que, pour certaines incidences, les rayons perdent complétement la propriété d'être réfléchis; et, quand ils traversent perpendiculairement des cristaux jouissant de la double réfraction, dans certaines positions ils cessent de donner deux images.

Digitized by Google

La lumière acquiert cette propriété par la réflexion et la réfraction sur la plupart des corps, et par la double réfraction à travers tous les corps qui donnent deux images.

Malus, à qui on doit la découverte de cette singulière propriété de la lumière, l'a désignée sous le nom de *polarisation*, d'après une hypothèse que Newton avait imaginée pour expliquer la double réfraction : ce grand géomètre supposait que les molécules lumineuses avaient deux sortes de pôles, ou plutôt de faces jouissant de propriétés physiques différentes ; que dans la lumière ordinaire les faces de même espèce des diverses molécules étaient tournées dans toutes sortes de sens ; mais que, par l'action du cristal, les unes étaient tournées parallèlement à la section principale, et les autres perpendiculairement, et que le genre de réfraction que les molécules éprouvaient tenait au sens dans lequel leurs faces étaient tournées relativement à la section principale.

1428. *Polarisation par réflexion à la première surface des corps.* Soit AB (*fig.* 869) un tuyau de cuivre mobile autour de la charnière X, et garni, à chaque extrémité, d'un tambour mobile terminé par deux tiges parallèles à l'axe du tuyau, qui supportent l'axe d'un petit miroir plan en verre noir. Les deux petits miroirs x et x' peuvent prendre toutes les inclinaisons possibles par rapport à l'axe du tuyau, et ces inclinaisons sont mesurées par des quarts de cercle divisés ; les axes de rotation des miroirs peuvent aussi prendre entre eux toutes les positions possibles à l'aide des deux tambours mobiles qui les supportent, et ces angles mesurés par les cercles divisés mn, $m'n'$, que parcourent des nonius fixés aux tambours. Le tuyau AB est garni intérieurement de deux diaphragmes qui ne laissent passer que les rayons parallèles à l'axe. Inclinons les miroirs de manière que leur direction fasse un angle de 35°25′ avec l'axe du tuyau AB, et ce tuyau de manière qu'on puisse apercevoir par réflexion sur le miroir x la lumière du ciel d'abord réfléchie sur le premier : quand les deux miroirs x et x' sont parallèles, les deux plans d'incidence coïncident, et on aperçoit une image brillante ; mais si, sans changer l'inclinaison des miroirs sur l'axe du tuyau, on fait tourner le tambour A de manière à faire varier la position du second plan de réflexion, on voit l'intensité de l'image décroître constamment, et disparaître quand les deux plans de réflexion sont rectangulaires ; au delà l'image reparaît et son intensité croît jusqu'à ce que les deux plans de réflexion coïncident de nouveau. En continuant le mouvement, l'intensité de la lumière décroît de nouveau, et disparaît encore quand les plans de réflexion sont rectangulaires ; enfin, dans le dernier cadran les variations sont les mêmes que dans le deuxième.

Ainsi un rayon réfléchi sur du verre sous une inclinaison de 35° 25′ a perdu la propriété de se réfléchir sous la même incidence quand le second plan d'incidence est perpendiculaire au premier.

Malus avait admis que l'intensité de la lumière réfléchie sur le second miroir était représentée pas $O \cos^2 i$, O étant l'intensité du rayon réfléchi quand les deux plans de réflexion coïncident, et i l'angle de ces deux plans. Depuis, cette loi a été constatée par M. Arago ; mais les détails des expériences n'ont point été publiés, du moins assez complétement pour en donner une idée bien nette.

Si dans l'expérience précédente, sans changer l'inclinaison du premier miroir, on change un peu celle du second, les intensités des images se succèdent de la même manière quand on fait varier l'angle des deux plans de réflexion ; mais l'image ne disparaît jamais complétement, l'intensité de la lumière est seulement à son minimum quand les plans sont rectangulaires. La même chose aurait lieu si, sans changer la position du miroir x', on changeait un peu celle de l'autre, ou à la fois celles des deux miroirs.

Digitized by Google

Lorsqu'un rayon de lumière a été réfléchi sur le verre sous l'incidence de 35° 25', on dit qu'il est polarisé dans le plan d'incidence.

1429. Les corps opaques qui ne sont pas trop réfringents, tels que le marbre, les vernis noirs, l'obésidienne, etc., polarisent complétement la lumière sous une certaine incidence; d'autres parfaitement diaphanes ou seulement translucides, mais qui ont un grand pouvoir réfringent, ne la polarisent jamais complétement, tels sont le diamant, le verre d'antimoine; mais, de tous les corps, ce sont les métaux qui polarisent le moins la lumière.

D'après M. Brewster, les corps ne polarisent complétement la lumière qu'autant que l'indice de réfraction est au-dessous de 1,7.

1430. Lorsqu'un rayon a été complétement polarisé, la modification qu'il a éprouvée est toujours la même, car ce rayon a perdu la propriété de se réfléchir sur tous les corps qui polarisent complétement la lumière lorsque l'angle d'incidence est égal à celui sous lequel ces substances polarisent la lumière, et que le plan de réflexion est perpendiculaire au plan de polarisation : ainsi, par exemple, la topaze polarise la lumière sous une incidence de 31°, l'eau sous une incidence de 37°, et un rayon polarisé par réflexion sur une quelconque de ces substances ne se réfléchirait pas sous une incidence de 35° 25' sur le verre, de 37° sur l'eau ou de 31° sur la topaze, si le plan de réflexion était perpendiculaire au plan primitif de réflexion ou au plan de polarisation.

Il résulte de là que, pour reconnaître si un rayon de lumière est polarisé en totalité ou en partie, et pour déterminer la direction du plan de polarisation, il faut le faire réfléchir sur la surface du verre sous un angle de 35° 5' à compter de la surface, et faire tourner le plan d'incidence : si, dans une certaine position de ce plan, la réflexion est nulle, le rayon était complétement polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence; si la lumière ne disparaît par complétement, s'il y a seulement un minimum de lumière, le rayon était partiellement polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence correspondant au minimum; enfin, s'il n'y a pas de variation d'intensité, le rayon était naturel.

1431. Lorsqu'un rayon a été polarisé dans un certain sens, il conserve sa polarisation dans le même sens quand il traverse perpendiculairement un milieu diaphane d'une épaisseur quelconque, pourvu que ce milieu ne jouisse pas de la double réfraction.

1432. Quand un rayon polarisé se réfléchit sur un corps, sous une incidence égale à celle sous laquelle le corps polarise complétement la lumière, le rayon réfléchi est entièrement polarisé dans le plan de réflexion, quelle que soit d'ailleurs la direction du plan primitif de polarisation; mais la quantité de lumière réfléchie varie suivant l'inclinaison du premier plan de polarisation sur le second. Pour toute autre incidence du rayon sur le second miroir, le rayon réfléchi est seulement polarisé en partie dans le second plan de réflexion. Or, comme la réflexion cesse quand ces deux plans sont rectangulaires et que les angles d'incidence sont ceux qui correspondent à la polarisation complète, il en résulte qu'*un rayon polarisé ne peut pas donner par réflexion, de lumière complétement polarisée dans un plan perpendicu laire.*

1433. Pour observer les angles sous lesquels les différentes substances polarisent la lumière, on pourrait se servir de l'appareil fig. 869 : on laisserait le miroir en verre x incliné sur l'axe de 35° 25', et à la place du miroir x' on mettrait une plaque polie du corps que l'on veut observer; on placerait les tambours de manière que les deux plans de réflexion soient à angle droit, et on ferait varier l'angle de la surface de la plaque avec l'axe du tuyau jusqu'à ce que l'image réfléchie dans le

Digitized by Google

miroir x disparaisse : l'angle de réflexion serait mesuré sur le quart de cercle ab. On emploie ordinairement un autre moyen qui est fondé sur une propriété très-remarquable dont jouissent les cristaux à double réfraction. Lorsque l'on reçoit à travers un cristal un rayon de lumière à l'état naturel, on aperçoit deux images; mais, quand le rayon qui pénètre le cristal est déjà polarisé, et qu'il le traverse perpendiculairement, on n'en aperçoit qu'une seule, quand la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation; c'est l'image ordinaire dans le premier cas et l'image extraordinaire dans le second. Ainsi, pour reconnaître si un rayon de lumière est polarisé, il faut le recevoir perpendiculairement sur un cristal de spath d'Islande, le tourner autour du rayon, et observer s'il y a deux positions dans lesquelles on n'aperçoit qu'une seule image; dans ce cas, le rayon était polarisé, si aucune des deux images ne disparaissait, et, s'il y avait seulement eu minimum d'intensité, le rayon serait seulement en partie polarisé.

Pour observer l'angle de polarisation des liquides, M. Biot emploie l'appareil suivant :

AB et *AC* (*fig.* 870) sont deux tiges de fer divisées, l'une verticale, l'autre horizontale. La première peut se transporter horizontalement, et son pied est garni d'un vernier; elle porte un disque circulaire mobile *V*, percé à son centre d'un orifice qui laisse passer les rayons de la flamme d'une bougie placée derrière. La tringle *AC* porte un support mobile *S* sur lequel on fixe, avec de la cire molle, un petit vase renfermant le liquide que l'on veut observer; la largeur de ce vase doit être assez grande pour que la surface du liquide au centre soit sensiblement plane. Lorsque le vase est placé, on le promène sur la ligne *AC* jusqu'à ce que le rayon réfléchi soit complétement polarisé : alors, au moyen des divisions correspondantes à l'orifice et au support du vase, et de la hauteur du vase, on obtient facilement l'angle de réflexion.

Le tableau suivant renferme les angles de polarisation de quelques substances :

NOMS DES SUBSTANCES.	ANGLES DE POLARISATION OBSERVÉS		MOYENNES.	OBSERVATIONS.
	PAR M. BIOT.	PAR M. ARAGO.		
Eau	36° 55′ 30″	37° 00′	36° 58′	Complète.
Huile de poisson rectifiée.	34 29 40	34 30	34 30	*Id.*
Ambre	33 25	. . .	33 25	*Id.*
Barite sulfatée . . .	32 12 30	32	32 6	*Id.*
Topaze.	. . . . .	31	31	*Id.*
Soufre natif	30 7	29 25	29 46	Incomplète.
Diamant	25	22 47	22 54	*Id.*

1434. *Loi de Brewster.* M. Brewster a découvert une relation très-importante entre l'angle de polarisation et l'indice de réfraction, relation qui permet de trouver le premier lorsque le dernier est connu. La loi dont il est question consiste en ce que, sous l'incidence correspondante à la polarisation complète, le rayon réfléchi est perpendiculaire au rayon réfracté : d'après cela, en partant de la relation $\sin i = n \sin r$, et en désignant par θ l'angle de polarisation à compter de la normale, on aura (*fig.* 871)

$$i = \theta, \; r = 90 - i,$$

Digitized by Google

et par suite $\sin \theta = n \cos \theta$,

et par conséquent $\tang \theta = n$;

ou, en comptant l'angle à partir de la surface,

$$\tang \theta = 1 : n.$$

D'après cette loi, l'angle de 35°23′, donné par Malus pour l'angle de polarisation du verre ordinaire, est un peu trop grand, il serait à peu près de 34°, ce résultat s'accordant avec l'expérience.

Cette loi est également applicable au cas où la lumière se réfléchit à la surface de contact de deux milieux; mais alors, en désignant par n l'indice du premier milieu, celui dans lequel la lumière est réfléchie, et par n' celui du second, on a $\tang \theta = n : n'$.

La loi de Brewster n'est point applicable quand la réflexion a lieu à la surface de cristaux qui possèdent la double réfraction : il y a probablement pour ces corps une loi correspondante; mais elle n'est pas connue.

1435. L'indice de réfraction étant variable avec la teinte des rayons de lumière, l'angle de polarisation est réellement différent pour les rayons qui composent la lumière blanche. A la vérité ces différences sont très-petites; mais elles sont cependant suffisantes pour empêcher la disparition complète de la lumière polarisée sur une glace, lorsque les deux plans de réflexion sont perpendiculaires : l'image est formée de lumière blanche, dans laquelle manquent les rayons qui ont été complétement polarisés. La coloration de cette image est très-sensible lorsque la lame polarisante possède un grand pouvoir dispersif, comme l'huile de cassia, le diamant et le chromate de plomb.

1436. *Polarisation par des réflexions successives.* Si on place deux plaques planes parallèles comme l'indique la figure 872, on pourra observer la lumière après qu'elle aura éprouvé un nombre quelconque de réflexions : on trouve ainsi que, si les plaques sont de nature à polariser complétement la lumière quand elle se présente sous une certaine incidence, sous toute autre incidence, et après un nombre de réflexions d'autant plus grand que l'incidence diffère davantage de celle qui correspond à la polarisation complète, le rayon réfléchi est complétement polarisé. Par des réflexions successives suffisamment multipliées on parvient aussi à polariser complétement la lumière à la surface des métaux : d'après M. Brewster, huit réflexions polarisent complétement la lumière d'une bougie sur des plaques d'acier; il en faut trente-six pour produire le même effet sur des plaques d'argent, le plan de polarisation étant celui des plans de réflexion.

1437. *Polarisation par réflexion à la seconde surface des corps transparents.* Malus, à qui on doit encore ce fait remarquable, l'a constaté de la manière suivante. Il fit tailler une plaque de verre ordinaire en prisme ayant pour base un trapèze $AA'BB'$ (*fig.* 873), dont l'angle B' était tel qu'un rayon réfracté provenant d'un rayon incident sur la première surface sous l'angle correspondant à la polarisation complète, après s'être réfléchi sur la seconde surface $A'B'$, rencontrait perpendiculairement la face BB' : le rayon émergent conservait alors le plan de polarisation qu'il possédait après la réflexion. On reconnut alors, en recevant le rayon sur une plaque de verre, qu'il était complétement polarisé dans le plan de réflexion. Malus fit aussi cette vérification par un procédé plus direct encore : il reçut le rayon émergent sur un prisme de verre CDE, dont les angles en C et en E étaient tels, que le rayon transmis perpendiculairement à la face CD, après s'être réfléchi sur la face CE, sous l'angle de polarisation, sortit perpendiculairement à la face DE; lorsque le second plan de

Digitized by Google

réflexion était perpendiculaire au premier, la lumière était complétement absorbée.

Le rayon incident correspondant à la polarisation complète par réflexion, et prolongé par réfraction, rencontrant la seconde surface, supposée parallèle à la première, sous l'angle de polarisation complète, ce dernier angle peut facilement se déduire de l'angle d'incidence : en effet on a (*fig.* 873) $\sin i = \cos \theta$, $\sin r = \cos \theta'$; et, comme $\sin i = n \sin r$, il vient $\cos \theta = n \cos \theta'$.

1438. *Polarisation par réfraction.* Supposons qu'un prisme de verre *ABC* (*fig.* 874) soit taillé de manière qu'un rayon incident *SI* dans la direction de la polarisation complète sorte perpendiculairement à la face *AC* : la polarisation du rayon réfracté ne sera pas changée. Or, si on analyse le rayon émergent, on trouve qu'il est polarisé, mais en partie seulement, et dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence. Si la lumière sortait du verre par une face parallèle à la face d'incidence, on trouverait que le faisceau émergent serait aussi polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence. Si l'angle d'incidence différait de l'angle de polarisation complète, le sens de la polarisation du rayon émergent serait encore le même.

M. Arago a constaté par des expériences, que nous rapporterons plus tard, que le rayon transmis à travers une plaque à face parallèle renfermait autant de lumière polarisée que le rayon réfléchi. D'après M. Brewster, cette loi s'appliquerait seulement au rayon réfracté et non au rayon transmis.

1439. *Polarisation de la lumière par des piles de glace.* Il résulte de ce qui précède que, si un rayon de lumière sous l'incidence de la polarisation complète traverse successivement des plaques transparentes parallèles *AB*, *A'B'*, etc. (*fig.* 876), la quantité de lumière polarisée ira en croissant avec le nombre des lames, et si leur nombre est suffisant, le dernier rayon émergent sera complétement polarisé. En effet la partie polarisée du rayon émergent *ab* ne pourra éprouver aucune réflexion à la surface supérieure de la seconde lame : car, s'il en était ainsi, comme l'angle d'incidence est de 35° 25′, et que le rayon réfléchi est entièrement polarisé dans le plan d'incidence, il s'ensuivrait qu'un rayon polarisé pourrait donner de la lumière polarisée dans un plan perpendiculaire; ce que nous avons reconnu impossible. Il en sera de même à la seconde surface, car l'inclinaison du rayon réfracté sur cette surface est précisément celle qui correspond à la polarisation complète par réflexion sur la seconde face : ainsi la partie polarisée du rayon qui pénètre dans la première lame traversera la seconde et toutes les suivantes sans éprouver d'altération. Quant à la partie non polarisée du rayon, elle éprouvera aux premières et aux secondes surfaces des divisions : la partie réfléchie sera polarisée dans le plan d'incidence, et la partie réfractée renfermera de la lumière polarisée perpendiculairement au plan de réfraction qui s'ajoutera à la première, et traversera successivement toutes les lames sans éprouver aucune diminution. On voit d'après cela que la quantité de lumière polarisée perpendiculairement au plan d'incidence croîtra avec le nombre des lames, tandis que la quantité de lumière non polarisée ira en décroissant : par conséquent, si le nombre des lames est suffisant, le rayon émergent sera complétement polarisé.

Nous venons de supposer que le rayon incident faisait avec la surface supérieure un angle de 35° 25′. Si l'angle était différent, les mêmes phénomènes se reproduiraient encore; mais on a reconnu que la quantité relative de lumière polarisée augmentait à mesure que les rayons se rapprochaient de la surface, tandis que l'intensité du rayon diminuait. La position la plus favorable pour obtenir le maximum d'intensité du rayon polarisé, c'est l'incidence de 35° 25′; mais, pour obtenir un rayon émergent presque complétement polarisé, il faut que la pile soit traversée très-obliquement par la lumière.

1440. *Polarisation par double réfraction.* Supposons qu'un rayon de lumière,

Digitized by Google

après avoir traversé perpendiculairement un rhomboïde de chaux carbonatée, soit reçu sur une glace, de manière que l'angle de réflexion soit égal à 35° 25', et que le plan de réflexion soit d'abord parallèle à la section principale du cristal, on ne verra par réflexion qu'une seule image, et ce sera l'image ordinaire; si au contraire le plan de réflexion est perpendiculaire à la section principale, on n'apercevra encore qu'une seule image : ce sera celle du rayon extraordinaire. Ainsi les deux faisceaux se comportent comme s'ils avaient été polarisés par le cristal, le rayon ordinaire suivant la section principale, le rayon extraordinaire perpendiculairement à cette section. Les phénomènes seraient encore les mêmes si on recevait les deux rayons sur une pile de glaces : si le plan d'incidence des rayons est parallèle à la section principale, on n'aperçoit que l'image extraordinaire, et quand le plan d'incidence est perpendiculaire à la section principale, c'est au contraire l'image ordinaire qui est visible.

On peut faire l'expérience d'une manière inverse plus facile à répéter, parce qu'elle n'exige pas que le cristal soit aussi parfait. On polarise un rayon de lumière sur le miroir x' de l'appareil *fig.* 869; on place en avant un limbe circulaire perpendiculaire à l'axe, au centre duquel se trouve une douille renfermant un cristal de chaux carbonatée perpendiculaire à l'axe du tuyau : en regardant à travers le cristal le rayon polarisé, on n'aperçoit que l'image ordinaire quand la section principale est parallèle au plan de polarisation du rayon; mais, si l'on fait tourner le cristal d'une manière continue, l'image extraordinaire paraît, son éclat va en croissant, tandis que celle de l'autre va en diminuant; et quand la section principale est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, l'image ordinaire a disparu et l'image extraordinaire a le plus grand éclat; si on continue le mouvement, l'image ordinaire reparaît, son éclat augmente, tandis que l'autre diminue, et ainsi de suite.

En partant de l'hypothèse de Malus, dont nous avons parlé précédemment, et en désignant par O et E les intensités des images ordinaires et extraordinaires, et par i l'angle de la section principale du rhomboïde et du plan primitif de polarisation, et par I l'intensité de la lumière d'une des deux images quand l'autre est évanouie, on aura

$$O = I \cos^2 i \text{ et } E = I \sin^2 i.$$

1441. On peut encore faire l'expérience à l'aide de deux rhomboïdes de chaux carbonatée superposés; les deux rayons qui sortent du premier étant polarisés dans le plan de la section principale et dans un plan perpendiculaire, on devra observer, dans les quatre images que l'on aperçoit à travers le deuxième rhomboïde, des variations d'intensité, qu'il serait facile de prévoir d'après ce qui précède, mais que nous devons cependant décrire avec détail.

Si on superpose deux rhomboïdes, et que l'on observe les images d'un point extérieur, on remarque que le rayon ordinaire du premier cristal se divise en général en deux autres, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire, qui ont la même intensité quand la section principale du deuxième cristal fait avec celle du premier un angle de 45°; pour toutes les autres positions les images ont des intensités inégales; lorsque les sections principales sont parallèles, le rayon extraordinaire s'évanouit, et quand elles sont perpendiculaires, c'est le rayon ordinaire. Le faisceau extraordinaire sorti du premier cristal présente, en traversant le second, des effets inverses : son image ordinaire devient nulle quand les sections sont parallèles; elle atteint au contraire son maximum quand les sections principales sont perpendiculaires; c'est alors son image extraordinaire qui disparaît. Les deux images qui disparaissent ne viennent point se confondre avec les autres; on les voit s'éteindre peu à peu à mesure que les autres augmentent d'intensité. En résumé, chaque faisceau en passant dans le second

Digitized by Google

cristal se divise en deux faisceaux qui ont une égale *intensité quand les sections* principales font un angle de 45°, et n'éprouve qu'un seul *mode de réfraction lorsque* les sections principales sont parallèles ou perpendiculaires : *cette nouvelle réfraction* est de même nature dans le premier cas et de nature contraire dans le second.

On peut facilement vérifier ces faits en regardant un point noir tracé sur un papier blanc à travers deux rhomboïdes dont on fait varier l'angle formé par les sections principales; mais, comme il est très-difficile de se procurer des rhomboïdes assez épais pour que les images soient suffisamment écartées, et en même temps assez transparents, et dont les surfaces soient assez polies pour qu'il y ait peu de lumière perdue par la réflexion, il est plus avantageux d'employer deux prismes d'un petit angle dont une des faces soit naturelle : alors les images sont assez écartées pour que l'on puisse bien les distinguer, et, à cause de la petitesse de l'angle réfringent, les intensités des rayons sont sensiblement les mêmes qu'en employant deux rhomboïdes ; on peut même achromatiser ces prismes à l'aide d'un prisme de verre ordinaire d'un angle convenable.

Ces modifications des quatre images se déduisent encore facilement de la loi de Malus : car, si on représente par l'unité l'intensité commune des deux rayons incidents sur le second rhomboïde, par O_o, O_e, E_o, E_e, les intensités des images ordinaires et extraordinaires qui résultent des faisceaux qui traversent ordinairement et extraordinairement le second rhomboïde, par i l'angle des deux sections principales des rhomboïdes, et en négligeant l'absorption, on aura

$$O_o = \cos^2 i, \quad E_o = \sin^2 i;$$
$$O_e = \sin^2 i, \quad E_e = \cos^2 i:$$

ainsi les quatre images se réduisent à deux quand $i = 0$ ou 90°, et elles ont la même intensité quand $i = 45°$.

1442. Si la lumière, avant de traverser le premier rhomboïde, était déjà polarisée dans un certain plan, en désignant par i l'angle du plan primitif de polarisation et de la section principale du premier rhomboïde, et par i' l'angle de cette section principale et de celle du second rhomboïde, les intensités des deux faisceaux à leur sortie du premier rhomboïde seraient

$$O = \cos^2 i \quad \text{et} \quad E = \sin^2 i;$$

et chacun d'eux, en sortant du second rhomboïde, produirait deux faisceaux dont les intensités seraient représentées par les équations suivantes :

$$O_o = \cos^2 i \cos^2 i', \quad E_o = \sin^2 i \cos^2 i';$$
$$O_e = \cos^2 i \sin^2 i', \quad E_e = \sin^2 i \sin^2 i'.$$

Aux limites extrêmes les résultats de ces formules s'accordent parfaitement avec l'expérience.

1443. Ainsi, quand un rayon de lumière polarisé dans un plan quelconque traverse un cristal biréfringent, le rayon se divise en deux parties, polarisées suivant la section principale et dans un plan perpendiculaire, et les intensités de ces rayons sont les mêmes que si l'intensité de la lumière dépendait du carré d'une certaine vitesse parallèle à la direction du plan de polarisation : car les intensités des faisceaux polarisés parallèlement ou perpendiculairement à la section principale du cristal ont exactement les valeurs des carrés des composantes d'une force parallèle au plan primitif de polarisation suivant ces directions.

Digitized by Google

1444. Il résulte de ce qui précède une conséquence très-importante : lorsque de la lumière, préalablement polarisée dans un certain plan, a été divisée en deux faisceaux égaux parallèles, polarisés dans deux plans perpendiculaires; par exemple, en traversant normalement une plaque mince cristallisée, dont la section principale fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, l'ensemble des deux faisceaux donne deux images égales en traversant une nouvelle plaque suffisamment épaisse pour qu'on puisse les observer : la lumière paraît alors complétement dépolarisée, et se comporte comme de la lumière naturelle.

1445. On a été conduit, d'après cela, à considérer la lumière ordinaire comme composée de deux faisceaux d'égale intensité, polarisée dans deux plans rectangulaires : nous verrons qu'en effet cette hypothèse s'accorde parfaitement bien avec tous les phénomènes.

1446. Ce qui précède ne s'applique qu'aux rayons qui traversent perpendiculairement deux rhomboïdes biréfringents d'une nature quelconque. Quand les incidences sont obliques, les intensités des images éprouvent des variations analogues, mais qui dépendent des angles des rayons avec la normale, et des inclinaisons des plans d'incidence sur la section principale.

1447. *Propriété remarquable de la tourmaline.* Tous les corps absorbent une certaine portion de la lumière qui les traverse; mais certains cristaux jouissent de la singulière propriété d'absorber de préférence les rayons polarisés dans une certaine direction. La tourmaline présente cette propriété à un haut degré. Si on taille un prisme de tourmaline de manière que l'arête soit parallèle à l'axe, et que l'angle réfringent soit très-petit, en observant une mire à travers les parties du prisme voisines du sommet de l'angle réfringent, on aperçoit deux images; mais, à mesure que le rayon traverse une plus grande épaisseur, on voit l'image ordinaire s'affaiblir de plus en plus et finir par disparaître : ainsi la tourmaline, sous une certaine épaisseur, a la propriété d'absorber les rayons polarisés dans sa section principale. L'épaisseur à laquelle l'absorption devient complète varie suivant la nature des tourmalines : dans celles qui sont brunes cette épaisseur est ordinairement moindre qu'un millimètre; mais les tourmalines d'une teinte bleuâtre et peu colorées ne présentent le phénomène en question qu'autant qu'elles ont une grande épaisseur. Si on taille un cristal de manière que deux faces soient perpendiculaires à l'axe, et que deux autres faces soient parallèles au même axe, quand le cristal est suffisamment épais, il est complétement opaque quand on regarde à travers les faces perpendiculaires à l'axe, et transparent quand on regarde à travers les autres faces. L'absorption de la lumière dans le premier cas provient évidemment de ce que la lumière qui traverse le cristal est toujours polarisée dans un plan qui passe par l'axe. Les lames de mica de deux à trois millimètres d'épaisseur offrent la même propriété quand le faisceau qui les traverse est incliné.

Il résulte de là que les plaques de tourmalines peuvent être employées pour reconnaître la lumière polarisée et la direction du plan de polarisation. L'appareil se compose d'une plaque suffisamment épaisse, taillée parallèlement à l'axe, qu'on fait tourner dans son plan, et à travers laquelle on regarde : quand la lumière incidente est complétement polarisée, la lumière disparaît lorsque la section principale de la plaque est parallèle au plan de polarisation; dans le cas où la polarisation n'est que partielle, on n'observe que des changements d'intensité. Nous ferons bientôt connaître des moyens bien plus exacts pour reconnaître les moindres traces de polarisation dans un rayon de lumière; mais une bonne tourmaline est suffisante pour constater les faits suivants :

1448. *Polarisation de la lumière du ciel et des planètes.* D'après M. Arago, la

Digitized by Google

lumière bleue du ciel est polarisée partiellement, et le maximum de polarisation a lieu à une distance angulaire du soleil égale à 90°.

La lumière qui a traversé un nuage n'est pas polarisée quand l'observateur est dans le nuage; mais, quand il en est dehors, elle est sensiblement polarisée : une épaisseur d'air de 50^{m} est suffisante pour produire cet effet.

La lumière de la lune contient une assez grande quantité de lumière polarisée; on s'en assure facilement en faisant les observations dans le premier quartier.

Quand on observe la polarisation de la lumière dans le plan vertical qui contient le soleil, on trouve que la polarisation croît jusqu'à 90° de l'astre; si on va plus loin, la polarisation diminue graduellement et disparaît tout à fait, et enfin change de signe. Ce fait est assez précis pour qu'un observateur, tournant le dos au soleil et cherchant le point de nulle polarisation, puisse assez bien indiquer l'azimuth et la hauteur du soleil. Si les physiciens anglais n'ont pu apercevoir le renversement du sens de la polarisation, il ne faut pas en être surpris : ils l'ont cherché dans le voisinage du soleil, tandis qu'il faut le chercher à l'opposite; toutefois le lieu de nulle polarisation ne dépend pas seulement du soleil, mais encore de l'état du ciel, et la présence de quelques nuages suffit pour le déplacer notablement. Le renversement de la polarisation paraît dépendre des réflexions multiples de la lumière par l'air.

1449. M. Arago a fait une application très-remarquable de la polarisation. En mer, à une certaine distance, les écueils submergés ne sont point aperçus par les marins, malgré la transparence des eaux, parce que les rayons qu'ils émettent sous une grande inclinaison éprouvent, par la réflexion à la surface des eaux, une perte qui en diminue beaucoup l'intensité, et surtout à cause de la grande intensité des rayons partis des différents points de l'horizon qui se réfléchissent à la surface de l'eau; mais, comme ces rayons sont en grande partie polarisés dans le plan d'incidence, on conçoit que, si on reçoit la lumière à travers une plaque de tourmaline dont la section principale soit parallèle au plan d'incidence, presque tous les rayons réfléchis seront absorbés, et l'écueil deviendra visible.

§ VIII. *Coloration de la lumière polarisée par les lames cristallisées.*

1450. Les phénomènes que nous allons décrire sont les plus remarquables de l'optique; ils ont été découverts par M. Arago. M. Biot en a reconnu les principales lois par l'expérience; mais c'est à Fresnel qu'on en doit l'explication.

Avant d'exposer ces phénomènes, nous décrirons quelques modifications apportées à l'appareil général de polarisation (869), et une autre disposition imaginée par M. de Norremberg.

1451. Dans l'appareil de polarisation (*fig.* 869) l'analyse de la lumière par la seconde glace est assez incommode, à cause du changement de direction des rayons réfléchis par la rotation du second plan de réflexion. On évite cet inconvénient en remplaçant le miroir par un prisme de chaux carbonatée achromatisé et les images ont plus d'intensité. Mais il est des circonstances dans lesquelles les deux images subsistent dans toutes les positions de la section principale, et ces images par leur *superposition* partielle deviennent moins distinctes. Il faut alors employer des *analyseurs qui absorbent* les rayons polarisés dans un certain plan, et qui conservent aux rayons émergents une direction sensiblement constante. Les plaques de tourmaline parallèles à l'axe satisfont à cette condition; mais leur teinte, en se mêlant à celle des images, en diminue l'éclat et en change la couleur : pour éviter ce dernier inconvénient on emploie différentes dispositions.

La plus simple consiste en deux plaques de verre noir *AB* et *CD* fixées parallèlement

Digitized by Google

dans un disque de liége (*fig.* 877), de manière que la première soit rencontrée par les rayons parallèles à l'axe du disque sous un angle de 34° à partir de sa surface, et par conséquent que l'angle *B* soit de 56°. Il est facile de voir que les rayons arriveront à l'œil dans la direction *PQ*, qui changera peu par la rotation de la plaque *XY*. On remplace avec avantage la seconde lame *CD* par un prisme de verre (*fig.* 878) dont les angles en *a* et *c* sont tels que le rayon réfléchi sur le miroir *AB* entre perpendiculairement à la face *ab*, et sorte perpendiculairement à la face *bc* après avoir éprouvé une réflexion totale sur la face *ac*.

1452. On a imaginé récemment un autre appareil qui donne beaucoup plus de lumière émergente. On prend un rhomboïde de spath d'Islande, ayant à peu près 1 pouce de longueur et 4 lignes de largeur et d'épaisseur; on le coupe en deux parties par un plan passant par les diagonales parallèles de deux des longues faces, et on réunit les deux parties par du baume de Canada dans la position qu'elles avaient d'abord. Lorsqu'on regarde longitudinalement à travers le rhomboïde ainsi préparé, on ne voit qu'une seule image; lorsqu'on place deux appareils l'un devant l'autre, si leurs sections principales coïncident, on lit facilement à travers un livre imprimé; mais, si leurs sections principales sont à angle droit, il y a obscurité complète. Cet appareil est bien préférable aux tourmalines à cause de la blancheur parfaite de la lumière transmise, que la teinte des tourmalines altère toujours.

L'explication du fait singulier que présente un rhomboïde de chaux carbonatée disposé comme nous venons de l'indiquer résulte de ce que les rayons de lumière rencontrent la couche de baume du Canada sous un angle compris entre les angles limites des rayons ordinaire et extraordinaire : car alors le rayon ordinaire dont l'angle limite est le plus petit éprouve une réflexion totale à la surface du baume, et l'autre seul peut le traverser. L'indice du baume est 1,549, et ceux des rayons ordinaire et extraordinaire dans le spath sont, comme nous l'avons déjà vu, 1,654 et 1,483.

1453. M. de Norremberg a imaginé un appareil de polarisation différent de celui que nous avons employé jusqu'ici, et qu'il est bon de connaître. Cet appareil, dont les figures 879 et 880 présentent deux projections, se compose de deux montants *AB* et *CD* fixés sur un socle en bois; entre eux et à la partie inférieure se trouve une glace plane étamée horizontale *EF*, et, à une certaine hauteur, une glace nue à faces parallèles *GH*, montée dans un cadre mobile autour de deux tourillons qui pénètrent à frottements durs dans les deux montants; au-dessus de cette glace se trouve un cadre circulaire qu'on peut fixer à différentes hauteurs; ce cadre renferme un anneau concentrique qui peut tourner sur lui-même, et qui contient un cadre circulaire mobile autour d'un axe horizontal, garni d'une glace nue à faces parallèles. Enfin, à la partie supérieure se trouve une plaque fixe *LM* percée d'un orifice circulaire dans lequel peut tourner une douille garnie, ou d'une plaque de verre noir inclinée, ou d'un des appareils d'analyse dont nous avons parlé. On incline la glace *GH* de manière que la lumière soit réfléchie à peu près sous l'angle de polarisation complète : les rayons réfléchis à la première et à la seconde surface, de haut en bas, retournent dans la direction opposée par la réflexion de la glace étamée *EF*, traversent les glaces *GH* et *IK*, et arrivent en *N* à l'analyseur, en conservant le même plan de polarisation.

1454. Il est facile de voir qu'au moyen de l'appareil (*fig.* 869), en plaçant entre les deux miroirs une lame de verre à faces parallèles, susceptible de tourner sur elle-même, et autour d'un axe perpendiculaire à celui du tube, et en fixant sur la lame de verre des plaques cristallisées, on pourra diriger leur section principale d'une manière quelconque par rapport au plan primitif de polarisation, et faire varier à

Digitized by Google

volonté la direction de leurs faces sur celle du rayon polarisé; et, si la nouvelle pièce mobile est garnie de deux cercles divisés, on pourra déterminer l'angle de leur section principale avec le plan primitif de polarisation, et leur inclinaison sur la direction des rayons de lumière. Toutes ces expériences pourront également se faire avec une grande facilité au moyen de l'appareil de M. de Norremberg, en fixant la plaque sur la glace IK.

Occupons-nous maintenant de la description des phénomènes que la lumière polarisée produit en traversant les lames minces.

1455. *Coloration de la lumière polarisée en traversant les lames minces cristallisées.* Lorsqu'on emploie l'appareil des deux miroirs (*fig.* 869), et que les deux plans de réflexion sont rectangulaires, nous savons que toute la lumière est absorbée; il en est de même quand on place l'une derrière l'autre deux plaques de tourmaline dont les sections principales sont à angle droit. Mais si on introduit entre les deux miroirs ou entre les deux tourmalines une lame cristallisée, la lumière reparaît quand sa section principale n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan primitif de polarisation, parce que la lumière qui sort de la lame cristallisée est composée de deux faisceaux polarisés, l'un dans sa section principale, l'autre dans un plan perpendiculaire. Mais si la lame cristallisée est suffisamment mince, elle se trouve colorée d'une teinte qui dépend de sa nature, de son épaisseur et des positions relatives de la section principale de la lame et des deux plans de réflexion dans le premier cas, ou des sections principales des deux tourmalines dans le second cas. Des phénomènes semblables apparaissent lorsque la lumière, après avoir traversé la lame mince, est reçue à travers un prisme épais biréfringent; mais on aperçoit à la fois deux images. Nous décrirons avec détail ces derniers phénomènes, attendu que nous en déduirons facilement les premiers.

1456. Considérons un rayon de lumière blanche complétement polarisée, traversant perpendiculairement une lame cristallisée d'une épaisseur convenable, et que nous supposerons d'abord à un seul axe. Supposons que la lumière, avant d'arriver à l'œil, traverse un prisme biréfringent, que la lame mince et le prisme puissent tourner sur eux-mêmes autour de l'axe du faisceau, de manière que les sections principales de la lame mince et du prisme puissent prendre toutes les inclinaisons possibles sur le plan primitif de polarisation, et que i et s représentent les angles de ces sections principales et du plan primitif.

Si i est égal à 0° ou à 90° les deux images sont blanches, quel que soit s, et l'une d'elles disparaît pour $s = 0$, ou $s = 90°$.

Si i est quelconque, en donnant à s successivement toutes les valeurs comprises entre 0° et 360°, on obtient les résultats suivants : 1° aucune des deux images ne disparaît; 2° les deux images sont blanches lorsque $s = i$ ou $s = i + 90°$, c'est-à-dire quand la section principale du prisme est parallèle ou perpendiculaire à celle de la lame mince; mais ces deux images ont des intensités d'autant plus inégales que l'angle i diffère davantage de 45° ou de 135° : 3° pour toutes les valeurs intermédiaires de s, les deux images sont toujours colorées, et les teintes sont complémentaires : car, lorsqu'elles se superposent en partie, la partie commune est blanche; 4° les intensités des deux images colorées varient avec s, mais sans changer de nature; le maximum d'intensité a lieu, pour une même valeur de i, quand $s = i + 45°$ ou $s = i + 135°$, c'est-à-dire précisément aux milieux des intervalles angulaires qui correspondent aux images blanches; 5° pour la même lame, la nature des teintes est aussi indépendante de i, mais elles ont le plus grand éclat possible quand $i = 45°$; 6° quand les images passent par le blanc elles échangent leurs teintes.

Si la section principale du rhomboïde fait un angle constant de 0° ou de 90° avec

Digitized by Google

le plan primitif de polarisation, et si on fait varier l'angle i pour $i = 0$, $i = 90°$, $i = 270°$, une des deux images est blanche, et l'autre disparaît; et le maximum d'éclat des deux images complémentaires a lieu pour $i = 45°$ ou $i = 135°$; mais pour toutes les valeurs de i, chaque image conserve invariablement la même teinte.

Lorsque le faisceau qui a traversé la plaque est reçu sur une glace inclinée, de manière à le polariser complétement, ou à travers une pile de glaces convenablement inclinée, ou à travers une tourmaline, les phénomènes sont les mêmes, seulement on n'aperçoit qu'une seule image.

1457. Lorsque la plaque, restant toujours perpendiculaire au faisceau, varie d'épaisseur, les teintes changent suivant les mêmes lois que dans les anneaux colorés par les variations d'épaisseur de la lame mince (M. Biot). Un prisme de chaux sulfatée donne toutes les teintes des anneaux, mais distribuées en bandes parallèles. En collant une lame de sulfate de chaux de 2 millimètres d'épaisseur sur une lame de verre et y creusant une cavité au tour avec de l'émeri fin, de manière que l'épaisseur au fond soit très-petite, on obtiendra des anneaux colorés semblables à ceux qu'on produit par la superposition de deux lentilles. En traçant avec une pointe des lignes sur des plaques minces de sulfate de chaux, les traits prennent des nuances différentes de celles des plaques et qui varient avec leur profondeur.

Quand la lame cristallisée est inclinée à la direction du faisceau, les teintes changent par l'accroissement d'inclinaison, et il se produit l'effet qui résulterait tantôt d'une augmentation, tantôt d'une diminution d'épaisseur.

1458. Les lames minces, pour produire les phénomènes dont il est question, peuvent être à un ou à deux axes; mais pour les cristaux à un axe, à quelques exceptions près, dont nous parlerons bientôt, l'axe ne doit point être perpendiculaire aux faces des lames; et pour les cristaux à deux axes, aucun ne doit être dans le même cas, attendu qu'en général il n'y a pas de double réflexion dans le sens des axes. Pour les cristaux à deux axes, les plans normaux qui passent par les lignes moyennes, c'est-à-dire celles qui divisent les angles des axes en deux parties égales, se comportent comme la section principale des cristaux à un axe et la section perpendiculaire, du moins quand une de ces lignes est parallèle aux faces de la lame. Dans tous les cas, les lames doivent avoir des épaisseurs comprises dans certaines limites. Le mica et la chaux sulfatée, par la facilité avec laquelle on les divise en lames minces, sont d'un usage très-commode. Pour la chaux sulfatée les limites sont $1^{mm},269$ et $0,423$. Cette dernière substance se divise naturellement en parallélogrammes; lorsque les côtés *ab* et *bc* (*fig.* 880 *A*) sont dans le rapport de 13 à 36, la grande diagonale *bd* coïncide avec la ligne moyenne, et les deux axes *be* et *bf* forment avec la ligne moyenne un angle de 30°. Les lames de chaux sulfatée et de cristal de roche parallèles à l'axe de même épaisseur donnent exactement les mêmes teintes. Quant au mica de Sibérie, le plan des axes est perpendiculaire aux lames. D'après M. Biot, les épaisseurs de mica et de chaux sulfatée qui donnent les mêmes teintes sont entre elles comme 696 : 365. Ces phénomènes ne pourraient pas être observés facilement avec des cristaux de carbonate de chaux, parce que les lames de cette substance devraient être trop minces. M. Biot a trouvé qu'une lame de chaux carbonatée, parallèle à l'axe, devrait être 18 fois plus mince qu'une lame de chaux sulfatée pour donner la même teinte.

1459. En superposant des plaques différentes et faisant varier leurs positions, il se produit des phénomènes qui souvent sont très-compliqués, que nous ne pouvons pas même énoncer, mais que la théorie permet de prévoir et de calculer, comme nous le verrons bientôt.

Nous dirons seulement que, quand on superpose deux plaques de même nature ayant des épaisseurs e et e', de manière que les sections principales soient parallèles

Digitized by Google

ou perpendiculaires, on obtient l'effet qui résulterait d'une seule *plaque de la même* substance ayant une épaisseur égale à $e + e'$ ou à $e - e'$.

Il est important de remarquer que, si on se servait de l'appareil *de M. de Norremberg*, et si on mettait la plaque mince sur la glace étamée *EF*, la lumière *polarisée* la traverserait deux fois, avant et après la réflexion sur la seconde surface, et par conséquent on obtiendrait les mêmes apparences que si la lame avait une épaisseur double et n'était traversée qu'une seule fois par la lumière.

1460. *Coloration de la lumière par des plaques épaisses cristallisées.* Nous avons dit qu'une plaque unique ne produisait pas de coloration quand son épaisseur excédait une certaine limite; mais si on prend deux plaques épaisses de la même substance et d'épaisseurs différentes et si on les superpose de manière que les sections principales soient à angle droit, on obtient la même coloration qu'avec une plaque mince dont l'épaisseur serait la différence des épaisseurs des plaques superposées. On obtient aussi des teintes colorées avec des plaques épaisses de différentes substances croisées ou parallèles.

1461. *Anneaux colorés produits par les lames minces cristallisées traversées par un faisceau de lumière polarisée.* Supposons qu'un faisceau de lumière blanche, convergente et polarisée, traverse perpendiculairement une plaque de chaux carbonatée taillée perpendiculairement à l'axe, et dont l'épaisseur soit de quatre à vingt millimètres : si on observe le rayon émergent avec une plaque de tourmaline, on aperçoit une série d'anneaux colorés concentriques. Lorsque la section principale de la plaque de tourmaline est parallèle à ce plan primitif de polarisation, la série des anneaux est coupée par une grande croix noire dont une des branches est parallèle à ce plan; quand au contraire la section principale de la tourmaline est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, la croix noire est remplacée par une croix blanche, et chaque point de la nouvelle image offre une couleur complémentaire de celle qu'il avait dans la première position (*fig.* 881 et 882). Avec une lumière homogène, les anneaux et les croix sont noirs et de la couleur de la lumière; les anneaux de même ordre de différentes teintes ont des diamètres qui augmentent avec la réfrangibilité des rayons et qui par conséquent croissent du rouge au violet. C'est la superposition partielle des anneaux de différentes teintes qui produit les anneaux irisés qui se manifestent dans la lumière blanche. Les diamètres des anneaux augmentent à mesure que l'épaisseur de la plaque devient plus petite. Les mêmes phénomènes se présentent avec des plaques minces de toutes les substances à un axe; mais les plaques de cristal de roche présentent des circonstances particulières dont il sera question en parlant de la polarisation circulaire.

1462. Pour observer ces phénomènes, on peut employer une grande plaque de verre noir ou de verre ordinaire noircie à la surface inférieure, sur laquelle on fait réfléchir la lumière des nues, et on place sous une incidence moyenne de 35° 25′ un tuyau court, dans lequel se trouve la lame perpendiculaire à l'axe et à l'extrémité une douille mobile portant la plaque de tourmaline, ou une seconde glace, ou une pile de glace, ou un prisme biréfringent achromatique, ou un des analyseurs dont nous avons parlé (1451). On ne pourrait pas se servir de l'appareil général de polarisation (*fig.* 869), parce que le faisceau de lumière ne serait pas assez convergent. On peut employer aussi une disposition beaucoup plus simple imaginée par M. Herschell. Cet appareil (*fig.* 883) se compose de deux tuyaux en cuivre *AB*, *A′B′*, qui peuvent facilement tourner l'un dans l'autre; le premier tuyau, intérieur, porte une plaque de tourmaline *T*, destinée à polariser le faisceau incident perpendiculairement à sa section principale, et en avant un verre *ZZ′*, dont le foyer tombe sensiblement sur la plaque *T*; le tube enveloppant porte la plaque perpendiculaire à l'axe *PP′* et

Digitized by Google

une seconde tourmaline T'; la plaque PP' peut tourner dans son plan à l'aide d'une petite tige et d'une échancrure pratiquée dans le tuyau AB. On place l'œil en T', et on dirige l'appareil vers le ciel. La lentille est destinée à rendre la lumière plus convergente, et à égaliser l'éclat du champ éclairé par une lumière naturelle ou artificielle. On emploie ordinairement un appareil plus simple, composé de deux disques de cuivre renfermant les plaques de tourmaline, qui peuvent tourner dans deux anneaux en fil de cuivre formés par un même fil (*fig.* 894), et que l'élasticité du métal maintient appliqués; on interpose entre les tourmalines des disques de liége renfermant les plaques cristallisées. Il est important de faire ces expériences à la lampe monochromatique : on aperçoit des courbes jaunes et noires qui couvrent tout le champ et qui sont incomparablement plus nettes que les bandes irisées dans la lumière blanche; mais il est alors indispensable de mettre en avant de la première tourmaline une glace dépolie ou une lentille afin d'étaler la lumière de la flamme dans toute l'étendue du champ. En employant la lumière blanche et des verres colorés, les bandes ne sont pas si nettes, parce que les verres absorbent trop de lumière et que toutes les teintes ont moins d'éclat que la lumière jaune.

1463. Tous les cristaux à un axe ne produisent pas nettement et régulièrement les apparences dont nous venons de parler. Quelquefois les anneaux sont ovales et les croix sont contournées; on doit attribuer ces anomalies à des défauts de cristallisation. Mais on a remarqué fréquemment dans les cristaux d'apophyltite du Tyrol un phénomène singulier dont on ne connaît point la cause : les anneaux n'ont presque d'autres teintes que le jaune verdâtre et le violet rougeâtre; et il ne se forme point d'anneaux dans la lumière jaune. Ce cristal est négatif pour une des extrémités du spectre, et positif pour l'autre.

1464. Lorsqu'un cristal à deux axes est taillé parallèlement ou perpendiculairement à la ligne moyenne, en opérant comme pour les cristaux à un axe, on aperçoit deux systèmes d'anneaux elliptiques, et une croix blanche ou noire (*fig.* 885). Lorsqu'on fait tourner la plaque mince autour de l'axe du faisceau sans changer le plan de polarisation primitif et la direction de la section principale de la tourmaline, les croix se déforment. Les figures 886, 887 et 888 représentent les apparences qui se produisent lorsque la rotation commence, et lorsqu'elle est de 1/4 et de 1/2 d'angle droit. Les mêmes phénomènes se produisent dans les quatre cadrans. Quand les axes forment entre eux un angle considérable, on ne peut pas apercevoir à la fois les deux systèmes d'anneaux, mais ils sont disposés comme dans les cristaux où les axes sont assez rapprochés pour que les deux systèmes d'anneaux puissent être observés simultanément.

Ces phénomènes peuvent être facilement observés dans les cristaux de nitre et d'aragonite : les axes sont peu inclinés, et on aperçoit à la fois les deux systèmes d'anneaux. Les cristaux de nitre ont ordinairement la forme d'un prisme à six pans; l'axe moyen étant parallèle à l'axe de figure du prisme, les plaques devront être taillées perpendiculairement à cet axe; l'angle des axes est d'environ 6°. Dans le mica et la topaze les faces de clivage sont perpendiculaires à l'axe moyen; comme les axes font un angle assez considérable, on ne peut apercevoir les anneaux que successivement en inclinant les plaques.

1465. Lorsque la plaque est éclairée successivement avec des faisceaux de lumière homogène, M. Herschell a observé que les centres des deux systèmes d'anneaux n'occupent pas rigoureusement la même place : ainsi on doit considérer les cristaux à deux axes comme renfermant deux systèmes d'axes, et chaque couple comme correspondant à chaque espèce de rayons.

Il résulte de là que, dans les cristaux où les systèmes d'axes diffèrent sensible-

Digitized by Google

ment, les anneaux dans la lumière blanche sont confus, et qu'on ne peut bien reconnaître leur forme qu'en les observant dans une lumière homogène.

Dans le tartrate de potasse, l'angle des axes des rayons violets est de 56°, et celui des rouges de 76°; les axes des autres teintes sont intermédiaires. La même chose a lieu dans les cristaux de carbonate de plomb, la topaze incolore, certaines variétés de micas, le diopside, le borax; et c'est le contraire pour les cristaux de nitre, de sucre et d'aragonite, c'est-à-dire l'angle des axes croît du rouge au violet. Dans le borax, les axes de différentes teintes ne sont pas dans le même plan : les plans des axes conjugués tournent dans le même sens du rouge au violet, et les pôles des diverses teintes sont situés sur deux droites parallèles.

1466. Herschell a reconnu que, dans les cristaux à deux axes taillés parallèlement ou perpendiculairement à la ligne moyenne, les courbes de même teinte, qu'il a désignées sous le nom de *lignes iso-chromatiques,* appartiennent à la classe des courbes connues sous le nom de *lemniscates;* dans ces courbes (*fig.* 889), le produit des distances d'un point quelconque aux deux foyers est égal à un nombre constant. Ces courbes n'acquièrent une grande netteté qu'à une lumière homogène, et surtout à celle de la flamme de l'alcool salé : on voit alors des lemniscates dans tout le champ de la vision, mais qui se resserrent toujours davantage. A mesure qu'elles s'étendent quand les axes se rapprochent, les parties des courbes qui environnent les pôles prennent des formes toujours plus voisines du cercle, et qui deviennent des cercles quand les axes se confondent; lorsqu'au contraire l'angle des axes augmente, les courbes s'allongent, les parties voisines du centre se rapprochent de la forme hyperbolique; et quand l'angle des axes devient égal à deux droits, c'est-à-dire quand le cristal est à un axe parallèle à la lame, les lemniscates deviennent des hyperboles équilatères. On peut facilement observer au moyen de la lampe monochromatique les bandes hyperboliques dans les plaques de spath d'Islande, de tourmaline claire, de cristal de roche, etc.

1467. Lorsqu'on superpose des plaques à un ou deux axes, on obtient des franges colorées diversement contournées, suivant leur nature, leur épaisseur et les positions des axes; nous nous contenterons d'indiquer les phénomènes les plus remarquables qu'on a observés.

1468. Si on prend une lame de mica d'environ $0^{mm},4$ d'épaisseur, cette lame, placée entre deux tourmalines croisées, laisse apercevoir, en inclinant un peu la plaque, les deux pôles des lemniscates : les bandes irisées sont très-larges dans la lumière blanche, et les courbes un peu diffuses; mais à la lumière de l'alcool salé elles sont très-nettes. Si on superpose deux plaques d'égale épaisseur, de manière que les plans des axes se coupent à angle droit, on aperçoit deux systèmes de courbes et quatre pôles (*fig.* 890). En croisant des lames de quartz égales, parallèles à l'axe, et de 5 à 6 millimètres d'épaisseur, on obtient des franges disposées comme dans la fig. 891. *AB* et *A'B'* (*fig.* 892) sont deux douilles en cuivre, renfermant chacune une plaque de cristal de roche perpendiculaire à l'axe d'environ 10 millimètres d'épaisseur. Les douilles sont mobiles séparément autour d'une charnière, et peuvent être inclinées entre elles d'une quantité quelconque; les charnières sont fixées à une tige *C* qui peut tourner sur elle-même; en avant se trouve une plaque de tourmaline *D*, qui peut tourner dans son plan. Quand les plaques *AB* et *A'B'* sont parallèles entre elles et à la plaque *D*, et qu'elles sont traversées par de la lumière polarisée, on aperçoit un seul système d'anneaux colorés concentriques sans croix; si on incline les plaques *AB* et *A'B'*, on aperçoit deux systèmes d'anneaux, d'autant plus séparés que les plaques sont plus inclinées, et entre eux, au milieu de la distance des centres, des franges transversales contournées dans la partie voisine des anneaux, qu'elles traver-

Digitized by Google

sent en partie. Quand l'angle des plaques excède 30°, les franges transversales sont sensiblement rectilignes et également espacées, et ne sont nettes qu'à une certaine distance des cercles, de chaque côté (*fig.* 893). On peut les suivre à une assez grande distance en tournant à droite ou à gauche la tige *C* au moyen du bouton qui y est fixé; en tournant la plaque *D* dans son plan, les teintes des franges changent, mais leurs contours restent les mêmes. La partie centrale du système des franges transversales est une bande noire entre deux bandes blanches, ou une bande blanche entre deux bandes noires; on passe de l'un à l'autre de ces deux systèmes en faisant tourner tout l'appareil, ou seulement la plaque *D*, de 90°.

Si on prend deux plaques de cristal de roche taillées parallèlement à l'une des faces naturelles des pyramides qui terminent le cristal, d'une épaisseur de 1 millimètre environ, et dont les faces forment entre elles un angle très-petit, mais de manière que dans l'une l'arête du prisme soit parallèle à l'axe, et que dans l'autre il soit perpendiculaire, en superposant les prismes de manière que les angles soient opposés, cette plaque, observée avec une tourmaline à la lumière réfléchie d'une glace noire, donne de magnifiques bandes colorées parallèles aux arêtes des prismes.

1469. *Appareil de M. Savart.* Si on coupe en deux parties une plaque de cristal de roche taillée parallèment à une des faces des pyramides qui terminent le cristal, de 1 à 2 millimètres d'épaisseur, et qu'on les superpose de manière que les arêtes qui étaient contiguës soient perpendiculaires, en observant cette plaque double à la lumière réfléchie par une glace noire, au travers d'une tourmaline, on aperçoit de très-belles bandes colorées hyperboliques, mais dont les parties centrales sont sensiblement rectilignes; et si on fixe la tourmaline oculaire aux deux plaques de manière que sa section principale divise en deux parties égales l'angle formé par les sections principales des plaques, en faisant tourner le système des trois plaques, les bandes colorées tournent en même temps. Le maximum d'éclat a lieu quand les bandes sont parallèles ou perpendiculaires au plan primitif de polarisation; mais dans le premier cas la partie centrale des franges est occupée par une bande blanche comprise entre deux bandes noires, et, dans le second cas, par une bande noire comprise entre deux bandes blanches. Comme cet appareil donne des franges très-appréciables avec la plus petite quantité de lumière polarisée, il est extrêmement commode pour reconnaître à la fois la lumière polarisée et la direction du plan de polarisation. Les plaques sont collées avec de la térébenthine, et fixées dans un disque de liége. Pour reconnaître par exemple la polarisation de la lumière du ciel, il faut tourner l'appareil jusqu'à ce que l'on aperçoive les franges au maximum d'éclat, et que la bande centrale soit blanche; la direction des franges sera celle du plan de polarisation de la lumière.

Lorsqu'on observe avec la flamme de l'alcool salé et deux plaques de quartz croisées, on aperçoit dans le champ, outre les bandes jaunes et noires, des figures qui ressemblent à des alvéoles d'abeilles.

1470. *Polarisation circulaire.* Lorsqu'un cristal à un seul axe de double réfraction est taillé perpendiculairement à l'axe, et qu'il est traversé perpendiculairement par un faisceau polarisé suivant une direction quelconque, le plan de polarisation reste le même après l'émergence : car le plan de polarisation primitif est toujours renfermé dans la section principale du cristal, puisque l'axe est parallèle à la direction du rayon incident. Mais M. Arago a reconnu que les plaques de cristal de roche taillées perpendiculairement à l'axe jouissaient de la propriété de faire tourner le plan de polarisation du faisceau qui les traversait. Certains cristaux font tourner le plan de polarisation primitif de droite à gauche, et d'autres de gauche à droite. On a observé dans ces phénomènes les lois suivantes :

Digitized by Google

1° Les plaques provenant d'un même cristal font tourner le plan de polarisation dans le même sens, et d'une quantité proportionnelle à leur épaisseur.

2° Les plaques d'égale épaisseur, provenant de cristaux qui agissent en sens contraire, produisent des déviations à très-peu près égales, mais en sens contraire.

3° Lorsque plusieurs plaques sont superposées, l'effet total est égal à la somme des effets produits par chacune d'elles si elles agissent dans le même sens, ou, à la différence des sommes des effets de même nature, si toutes les plaques n'agissent pas de la même manière.

4° Lorsqu'une même plaque reçoit successivement des faisceaux homogènes polarisés suivant la même direction, la déviation est d'autant plus grande que le faisceau est plus réfrangible. D'après M. Biot, dans une plaque de cristal de roche de 1 millimètre d'épaisseur les déviations du plan de polarisation sont :

Pour le rouge extrême.	17° 29′ 47″
Pour la limite du rouge et de l'orangé.	20 28 47
— de l'orangé et du jaune	22 18 49
— du jaune et du vert	25 40 31
— du vert et du bleu.	30 2 45
— du bleu et de l'indigo.	34 34 18
— de l'indigo et du violet.	37 51 58
Pour le violet extrême.	44 4 58

1471. Si on fait passer à travers une plaque de cristal de roche perpendiculaire à l'axe un faisceau de lumière blanche que l'on reçoit à travers un rhomboïde de chaux carbonatée, on obtient deux images colorées. L'image ordinaire résulte de la superposition de toutes les images ordinaires fournies par les différents rayons colorés, et il en est de même de l'image extraordinaire : or, comme les plans de polarisation des différents rayons ne coïncident pas, chacune des deux images n'aura pas une teinte constante; mais il est facile de voir que les teintes des deux images seront complémentaires. En employant les données précédentes et la méthode de Newton pour obtenir la teinte résultant d'un mélange quelconque de rayons, on peut déterminer la teinte des deux images : c'est ce que M. Biot a fait dans plusieurs cas particuliers, et les résultats du calcul se sont trouvés parfaitement d'accord avec l'expérience.

1472. Les anneaux colorés produits par des plaques épaisses de cristal de roche ne présentent pas les mêmes apparences que ceux qui sont produits par les autres cristaux à un axe. Dans la lumière blanche, une large plaque centrale est couverte d'une teinte uniforme qui change par la rotation de la plaque de tourmaline; au delà, on aperçoit à peine des traces des croix blanches ou noires. Lorsqu'on observe à travers un verre rouge, en faisant tourner la tourmaline dans un sens, on voit naître, du centre, des cercles alternativement noirs et rouges; par le mouvement contraire, les cercles diminuent de diamètre et disparaissent au centre. Quand, en tournant la tourmaline de gauche à droite, dans le sens de la rotation d'un tire-bouchon qu'on enfonce dans le liége, les cercles marchent du centre à la circonférence, le cristal tourne à droite ; dans le cas contraire il tourne à gauche.

Lorsque les plaques ont une épaisseur comprise entre 1 et 5 millimètres, la partie centrale des anneaux n'a plus une teinte uniforme; elle est occupée, tantôt par une croix colorée, qui ne s'étend pas jusqu'aux premiers anneaux, et dont les branches sont d'autant plus courtes que le cristal sera plus épais; tantôt par quatre taches colorées; il y a toujours une position de la tourmaline pour laquelle la croix est bleue. Cette teinte passe au violet quand on tourne très-peu la tourmaline dans le sens de la rotation du quartz. Lorsque les plaques sont très-minces, ce bleu est très-

Digitized by Google

foncé, et le moindre mouvement le fait passer au violet sombre peu appréciable, et ensuite au jaune sale. Lorsqu'on met une plaque de quartz de 2mm sur la glace *FF* de l'appareil (*fig.* 879), et au-dessus une lentille convergente, on aperçoit deux *S* croisées (*fig.* 893 *A*) dont les convexités sont tournées dans le sens de la rotation de la plaque. Si on superpose deux plaques qui tournent en sens contraire, en observant avec deux tourmalines croisées, on voit les mêmes figures; le sens des courbures est déterminé par la plaque la plus voisine de l'œil. On rencontre souvent des cristaux de quartz dans lesquels des accidents de cristallisation troublent la régularité des apparences que nous avons décrites. On trouve dans les *Mémoires de la société de Lille*, 1834, plusieurs Mémoires de M. Delezène qui contiennent beaucoup d'observations très-curieuses sur les phénomènes dont il est question.

1473. De toutes les substances solides examinées jusqu'ici, le quartz est la seule qui présente les phénomènes dont il s'agit. Mais M. Biot a rencontré la même propriété dans plusieurs corps liquides et gazeux; telles sont les huiles essentielles de térébenthine, la dissolution de camphre dans l'alcool, l'huile essentielle de laurier, l'huile essentielle de citron et le sirop de sucre concentré. Les trois premières substances font tourner le plan de polarisation de droite à gauche, et les dernières de gauche à droite. Les actions de ces substances sont cependant beaucoup plus faibles que celles du cristal de roche; on en jugera par le tableau suivant, dans lequel tous les corps sont supposés avoir une épaisseur de 1 millimètre, et éclairés par la lumière rouge.

Cristal de roche.	rotation.	18° 24′ 50″
Huile essentielle de térébenthine.		16 16
Solution alcoolique de camphre.		1 5
Huile essentielle de citron.		26 10
Sirop de sucre concentré.		33 14

Pour les autres teintes les relations sont dans les mêmes rapports. Ainsi, pour obtenir la même déviation avec une lame de quartz et les liquides dont nous venons de parler, il faut faire traverser au rayon polarisé des épaisseurs beaucoup plus grandes de liquide que de quartz. On fait les expériences sur les liquides, en les renfermant dans de longs tuyaux fermés par des plaques de verre à faces parallèles. Lorsqu'on mêle différents liquides, et même des vapeurs, l'effet total est égal à la somme ou à la différence des effets qui seraient produits séparément par les corps mêlés, et ce résultat a lieu même pour les corps qui agissent chimiquement. Les physiciens qui se sont les plus occupés de ces phénomènes sont MM. Biot et Seebeck.

1474. *Double réfraction produite dans les corps par la compression.* Dès l'origine de la découverte de la double réfraction, on a pensé qu'elle résultait de l'inégalité des corps dans différentes directions. D'après cela, les corps qui réfractent simplement la lumière devaient acquérir la propriété des cristaux jouissant de la double réfraction, si leur constitution physique était modifiée de manière à rendre inégale leur élasticité dans différentes directions. Les expériences suivantes confirment ces inductions théoriques.

Soient *A, B, C, D* (*fig.* 894), quatre prismes de verre égaux rectangulaires, et placés les uns à côté des autres par les faces opposées à l'angle dièdre droit; supposons qu'on ait placé des cartons sur les bouts des prismes, ensuite des barres d'acier, et qu'à l'aide d'un ou de plusieurs étaux, on les ait fortement comprimés, de manière à en diminuer la longueur. Les prismes étant dans cet état de compression, on applique entre eux cinq autres prismes *E, F, G, H, I*, destinés à former avec les

Digitized by Google

premiers un parallélipipède *MNPQ*. L'appareil étant ainsi disposé, si on regarde à travers les faces *MN* et *PQ* un objet situé à une distance d'un mètre, on aperçoit deux images qui jouissent de toutes les propriétés de celles qui se forment dans les cristaux doués de la double réfraction. La combinaison des prismes que nous venons d'indiquer est destinée à augmenter la déviation des deux images; elle serait insensible si on avait opéré sur un parallélipipède de verre. La cause de l'accroissement de déviation résulte du passage de la lumière dans des prismes qui sont alternativement comprimés et dans l'état naturel.

1475. La double réfraction produite par la compression développe dans la lumière polarisée des images colorées, analogues à celles que font naître les corps cristallisés, mais qui ont bien plus d'éclat et qui peuvent prendre des formes bien plus variées.

Lorsqu'on courbe une lame de verre longue et étroite, d'une épaisseur à peu près égale à sa largeur, au moyen de l'appareil *fig.* 895, en faisant traverser la plaque de verre par de la lumière polarisée que l'on reçoit ensuite à travers une plaque de tourmaline, on voit de brillantes bandes colorées parallèles à sa longueur, symétriquement placées, et dont le nombre et l'éclat augmentent avec la compression (*fig.* 896).

Si on comprime une plaque de verre épaisse rectangulaire, par exemple une plaque de glace de 2 à 3 centimètres de côté, au moyen de l'appareil fig. 897, il se produit autour des centres de compression des anneaux colorés très-brillants, semblables à ceux des plumes de paon. Quand la lumière émergente de la tourmaline est perpendiculaire au plan primitif de polarisation, et que la direction de la ligne passant par les centres de compression est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, le champ éclairé est circulaire, il est traversé par une croix noire dont une des branches aboutit aux centres des anneaux (*fig.* 898); et quand la direction de la ligne des centres est inclinée de 45° au plan primitif de polarisation, les anneaux sont réunis par une bande colorée uniforme rétrécie au centre (*fig.* 899).

M. Brewster a reconnu des phénomènes analogues dans les gelées animales comprimées entre deux lames de verre.

On conçoit facilement d'après cela, que la compression des plaques cristallisées change complétement la nature et la disposition des franges colorées qu'elles produisent dans la lumière polarisée.

1476. *Influence de la chaleur sur le verre.* Si on chauffe uniformément dans l'huile bouillante une plaque de verre circulaire, et qu'on la place ensuite dans un anneau métallique de manière à refroidir promptement sa circonférence, la plaque, par suite de l'inégalité de température qui s'établit, produit dans la lumière polarisée des anneaux circulaires avec une croix noire ou blanche, qui disparaissent lorsque le refroidissement est complet. Si on place une plaque rectangulaire de verre épais dans un cadre métallique chauffé à une haute température, la plaque fait voir dans la lumière polarisée une croix noire ou blanche, et aux quatre angles des anneaux colorés. Si on pose une plaque de verre par son bord inférieur sur une plaque métallique chauffée au rouge, les bandes irisées produisent la fig. 900; la symétrie provient probablement de la compression que la partie supérieure éprouve par suite de la dilatation des parties voisines de la plaque métallique; en croisant deux plaques chauffées de la même manière, la partie commune présente des anneaux elliptiques.

1477. *Influence de la chaleur sur les plaques cristallisées.* Fresnel a observé que la chaleur dilate moins le sulfate de chaux dans la direction du plan des axes que dans une direction perpendiculaire; M. Mitscherlich a trouvé le contraire pour la chaux carbonatée, de sorte que par la chaleur, la forme primitive se rapproche du cube. Ce dernier physicien a reconnu que dans le sulfate de chaux la chaleur rappro-

Digitized by Google

chait graduellement les deux axes, qui se réunissaient à une certaine température, et au delà se séparaient en marchant toujours dans le même sens. M. Brewster a reconnu la même chose dans la glauberite.

1478. *Influence de la trempe sur les plaques de verre.* Si on chauffe au rouge des plaques épaisses de verre de différentes formes, et si on les refroidit rapidement en les agitant dans l'air, elles prennent la propriété permanente de développer dans la lumière polarisée les plus brillantes couleurs; les franges colorées sont disposées de différentes manières, suivant la forme du contour de la plaque. Nous décrirons seulement les figures qu'on observe dans des plaques circulaires et carrées. Avec une plaque circulaire ou obtient les mêmes apparences qu'avec les cristaux à un axe taillés perpendiculairement à l'axe : on voit des anneaux colorés traversés par une croix noire ou blanche, suivant la position de la section principale de la tourmaline oculaire; mais les anneaux sont moins nombreux et moins nets. Lorsqu'on emploie une plaque carrée, et que la tourmaline oculaire est placée d'abord de manière à absorber complétement la lumière réfléchie par la glace, et ensuite à 90°, on obtient les figures 901 et 902, qui sont d'une grande régularité. Avec des plaques triangulaires, on obtient des figures différentes et des systèmes d'anneaux à chaque angle. Ces figures sont exactement les mêmes que celles qu'on obtient en mettant des plaques de verre non trempées dans des cadres métalliques de même forme et fortement chauffés.

On peut constater par une expérience directe la double réfraction du verre trempé : si on prend un prisme de verre trempé ayant un angle au sommet de 90°, et si, après l'avoir divisé en quatre, on range ces quatre prismes, *A, B, C, D* (*fig.* 894), sur une plaque de verre, et si on remplit les intervalles par des prismes, *E, F, G, H, I,* de verre ordinaire collés avec de la térébenthine, en observant à travers tous ces prismes un fil placé à un ou deux mètres, et parallèle aux arêtes des prismes, on voit deux images très-distinctes (M. Guérard).

1479. *Influence de l'induration.* Lorsqu'on fait sécher de la colle de poisson dans un moule de verre circulaire, la plaque donne des anneaux circulaires avec une croix, comme les plaques de verre circulaires trempées. Avec des moules de différentes formes on obtient des figures analogues à celles des lames de verre trempées de même forme : on en conçoit facilement la raison, car la dessiccation produit un effet de même nature que celui qui résulte de la trempe (Brewster).

Les images colorées produites artificiellement dans les plaques par la compression, la chaleur, la trempe et l'induration, sont beaucoup plus brillantes, et les franges sont beaucoup plus nombreuses quand on emploie l'appareil de M. de Norremberg, et que les plaques sont placées sur la glace étamée, que quand on les place sur la glace *IK*, ou quand on emploie tout autre appareil polarisant : ainsi, par exemple, avec un verre circulaire trempé vu dans une glace noire, avec une tourmaline, on n'aperçoit qu'un seul système d'anneaux placé près de la circonférence, tandis que la même plaque mise sur la glace *EF* de l'appareil de M. de Norremberg en laisse apercevoir trois bien distincts. Avec une plaque carrée de verre trempé, les croix blanches et noires des fig. 901 et 902 sont environnées de quatre franges colorées parallèles à la frange unique de ces deux figures. Cette différence provient de ce que, dans l'appareil de M. de Norremberg, quand la plaque est placée sur la glace étamée, elle est traversée deux fois par la lumière polarisée, et se comporte comme si son épaisseur était double, circonstance qui diminue la largeur des franges et en augmente le nombre.

Tous les phénomènes produits par la compression, la chaleur, la trempe, l'induration, diffèrent complétement de ceux que présentent les plaques cristallisées, par

Digitized by Google

ces deux circonstances essentielles, que les figures dépendent de la forme du contour des plaques, et qu'elles se produisent dans la lumière parallèle, tandis que dans les lames cristallisées elles sont indépendantes de la forme des plaques, et qu'elles exigent de la lumière convergente. De la première circonstance il résulte que dans les lames cristallisées les phénomènes dépendent d'une structure qui est la même autour de chaque normale, tandis que dans les lames chauffées ou comprimées ils dépendent de l'élasticité de l'ensemble. Aussi, pour observer les phénomènes des lames cristallisées, il suffit d'observer une partie quelconque de leur surface; tandis que, pour observer les couleurs développées artificiellement dans les plaques, il faut les voir dans toute leur étendue. C'est pourquoi ces derniers phénomènes ne peuvent pas être observés en plaçant les plaques entre deux tourmalines, qu'il faut employer les appareils fig. 869 et 879, ou la lumière réfléchie par une glace, et observer avec une tourmaline.

1480. *Absorption de la lumière polarisée par les cristaux.* Les cristaux colorés jouissent presque tous de la propriété d'absorber inégalement la lumière homogène qui les traverse dans différentes directions, et par conséquent d'avoir dans la lumière blanche différentes couleurs par transmission : ainsi l'hydro-chlorate de palladium est d'un rouge foncé vu dans le sens de l'axe, et d'un vert brillant dans la direction transversale (Wollaston); l'iolite ou dichroïte présente le même phénomène. Cette propriété porte le nom de *dichroïsme.* On peut facilement reconnaître cette inégale absorption, en prenant des plaques assez épaisses qu'on fait traverser par la lumière polarisée : en regardant directement à travers, les teintes ne sont pas les mêmes quand la section principale est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation. La propriété de la tourmaline d'absorber complétement sous une certaine épaisseur la lumière polarisée parallèlement à sa section principale rentre évidemment dans la classe des phénomènes de dichroïsme.

§ IX. *Polarisation de la chaleur.*

1481. En 1810, M. Bérard avait annoncé que la chaleur rayonnante éprouvait la double réfraction, et se polarisait comme la lumière. Les résultats des expériences de M. Bérard furent ensuite révoqués en doute par M. Powell, puis par M. Melloni et Nobili; mais, à la fin de 1834, M. Forbes reconnut des signes bien marqués de polarisation dans la chaleur transmise à travers des plaques de tourmaline ou des piles minces de mica. Dans ces expériences, la plus forte quantité de lumière polarisée fut donnée par un système de piles de mica, et s'éleva à 40/100, en employant la chaleur émanée d'une spirale de platine, maintenue à l'état d'incandescence par la flamme de l'alcool; mais cette proportion descendit à 17/100 ou 6/100 en faisant agir les mêmes piles sur la chaleur émanée d'un vase chauffé par le mercure ou l'eau en ébullition.

Depuis, M. Melloni a étudié avec beaucoup de soin la polarisation de la chaleur, et ses expériences ont confirmé celles de M. Forbes. Nous décrirons succinctement l'appareil employé par M. Melloni, et nous rapporterons les principaux résultats qu'il a obtenus.

1482. L'appareil consistait en un multiplicateur d'une grande sensibilité, en relation avec une pile thermo-électrique, dont une des extrémités recevait le faisceau de chaleur, après qu'il avait traversé deux tourmalines, dont les axes étaient successivement parallèles et perpendiculaires. Mais, pour éviter l'influence de l'inégalité de température de l'air, la pile était renfermée dans une cloche garnie de deux orifices latéraux dans la direction de l'axe de la pile; et, pour obtenir un accroissement

Digitized by Google

d'intensité dans les faisceaux incidents et émergents, la chaleur émanée de la source était reçue sur une large lentille de sel gemme, et arrivait ensuite à la pile en traversant une seconde lentille de la même substance, d'un plus court foyer, placée à une distance du foyer de la première égale à sa distance focale principale. Le système des deux tourmalines était placé au delà du foyer commun des deux lentilles, afin que les rayons provenant de l'échauffement des tourmalines fussent divergents après la seconde lentille, et n'arrivassent point à la pile. La première lentille avait 2 pouces et demi de diamètre et 3 pouces de distance focale, la seconde 14 lignes de foyer. Avec certaines tourmalines et une lampe sans verre et à réflecteur placée à 1 mètre, les déviations étaient portées de 60 à 80°. M. Melloni a employé différentes espèces de tourmaline, différentes sources de chaleur et différentes plaques diathermanes, et il observait les déviations lorsque les axes des tourmalines étaient successivement parallèles et perpendiculaires; des déviations il déduisait les forces de déviation et les intensités relatives des rayons de chaleur absorbés par la pile, car ces deux dernières quantités sont proportionnelles; il estimait ensuite la perte de chaleur en centièmes de la quantité de chaleur transmise quand les axes étaient parallèles.

1483. En employant la flamme d'une lampe de Locatelli (lampe sans verre), l'absorption varie avec la nature des tourmalines de 3,71 à 22 centièmes; les tourmalines vert-foncé et jaune-fauve donnent les limites extrêmes.

En se servant du système des tourmalines qui produisait la plus grande absorption, et plaçant dans le faisceau incident des plaques diathermanes de différente nature, on trouve que les verres de différentes couleurs ne changent pas sensiblement l'absorption, excepté les verres vert et noir opaque, qui la font baisser de 22 à 2 ou 3; que, pour la chaux sulfatée, l'ambre jaune, l'eau pure ou chargée de sels et l'alun, les quantités de chaleurs absorbées s'élèvent de 22/100 à 38/100, 51/100, 67/100 et 96/100. Ainsi, pour la chaleur qui sort de l'alun, l'absorption est aussi complète que pour la lumière.

Les mêmes expériences, répétées avec d'autres couples de tourmalines qui absorbent moins la chaleur directe de la source, donnent d'autres résultats.

En employant différents systèmes de tourmalines et différentes sources de chaleur, on trouve des résultats qui ne varient pas dans le même sens.

1484. Le fait d'une diminution dans la quantité de chaleur transmise à travers un système de deux plaques de tourmalines, quand les axes d'abord parallèles deviennent perpendiculaires, ne permet pas de douter que la chaleur, en traversant les plaques cristallisées, ne se polarise comme la lumière; quant à la variation des quantités de chaleurs absorbées, on en rend compte très-facilement, en considérant que la chaleur émanée de différentes sources est formée de rayons de nature différente en différentes proportions, qu'il en est de même du faisceau de chaleur transmis à travers une tourmaline, et que la faculté absorbante des rayons polarisés dans la section principale varie pour chaque rayon élémentaire et chaque espèce de tourmaline.

§ X. *Météores lumineux.*

1485. Les phénomènes lumineux qui se développent dans l'atmosphère sont nombreux; nous les examinerons successivement.

1486. *Crépuscule.* On désigne ainsi la lumière qui précède le lever du soleil et qui suit son coucher : le crépuscule du matin porte aussi le nom d'*aurore*. Le crépuscule du soir et du matin provient de la réflexion de la lumière par les parties supérieures de l'atmosphère. L'aurore commence quand le soleil est encore à 18° sous l'horizon; le crépuscule finit quand le soleil est descendu plus bas, à cause que

Digitized by Google

l'atmosphère échauffée est plus élevée le soir que le matin. En admettant qu'à la fin du crépuscule du soir la lumière provienne de la réflexion par les dernières limites de l'atmosphère, la durée du crépuscule peut servir à déterminer une valeur approximative de la hauteur de l'atmosphère : en effet, désignons par t la durée du crépuscule estimée en heure, $t : 24$ sera l'arc décrit par le soleil au-dessous de l'horizon, la conférence étant 1, et cet arc en degrés sera $t \div 360 : 24$; nous le désignerons par ι. Cela posé, soient a (*fig.* 903) un point de la terre, om le rayon de la limite de l'atmosphère : à la fin du crépuscule, les rayons solaires réfléchis à la limite de l'atmosphère seront dans la direction ma de l'horizon du point a, et les rayons solaires auront la direction mp ou or ; l'angle qor sera ι, l'angle amo sera égal à $90° - \iota,2$; et, en connaissant le rayon oa de la terre, on pourra, dans le triangle rectangle moa, calculer mo, et par suite $mo - ao$. On a trouvé ainsi environ 71,000 mètres pour la hauteur de l'atmosphère. Plusieurs physiciens pensent que, pour déterminer la hauteur par la durée du crépuscule, il faudrait considérer plusieurs réflexions.

1487. *Déviation des rayons qui traversent l'atmosphère.* L'atmosphère ayant une densité décroissante à partir de la surface de la terre, tous les rayons qui ne le traversent pas perpendiculairement aux surfaces de même densité sont déviés et se rapprochent de la verticale d'une manière continue, de sorte que la lumière suit réellement une trajectoire curviligne (*fig.* 904). Or, comme nous voyons toujours les corps dans la dernière direction des rayons qui arrivent à l'œil, il s'ensuit que nous voyons les corps plus élevés qu'ils ne le sont réellement, et d'autant plus qu'ils sont plus près de l'horizon ; à l'horizon, cet effet est à peu près de 30′.

Rayons divergents. Lorsque les rayons solaires pénètrent dans une chambre obscure, les parcelles de poussière répandues dans l'air qu'ils éclairent les rendent visibles. On conçoit facilement qu'on doit apercevoir aussi les rayons de lumière qui passent à travers les interstices des nuages obscurs qui sont placés du côté du soleil. Ces rayons sont parallèles, et cependant paraissent divergents du côté du soleil, parallèles au zénith, et convergents vers le point opposé du ciel. Ces apparences sont évidemment un effet de perspective : les rayons paraissent plus rapprochés dans les parties les plus éloignées du spectateur.

1488. *Mirage.* Nous avons vu que, quand un rayon lumineux sortait d'un milieu pour entrer dans un autre d'une moindre densité, le rayon s'écartait de la normale, et que la réfraction se changeait en réflexion, lorsque les rayons étaient suffisamment inclinés sur la surface de séparation. On conçoit dès lors que, si le milieu $ABCD$ (*fig.* 905) allait en décroissant de densité de AB en CD, des rayons partis du point M et suffisamment inclinés se relèveraient à une certaine profondeur, d'autant plus grande qu'ils seraient moins inclinés, et par conséquent on apercevrait deux images de l'objet, l'une droite, provenant des rayons directs, l'autre renversée, provenant des rayons qui auraient éprouvé une espèce de réflexion. Cette circonstance se rencontre dans les grandes plaines sablonneuses fortement échauffées par les rayons solaires : les couches d'air immédiatement en contact avec le sol se trouvant à une température plus élevée que les couches supérieures, on y aperçoit distinctement les images droites et renversées des objets placés à l'horizon. Le mirage a été souvent observé par l'armée française pendant l'expédition d'Égypte. Le sol de la Basse-Égypte est une vaste plaine dont l'uniformité n'est interrompue que par quelques éminences où sont placés les villages : lorsque la surface du sol est échauffée par la présence du soleil, le terrain semble terminé par une inondation générale ; chaque monticule présente au-dessous son image renversée comme s'il était entouré d'eau. Le mirage a lieu aussi quelquefois en mer ; mais il est moins fréquent et plus faible que sur terre. Ces phénomènes ont encore été observés par MM. Biot et Mathieu aux environs de

Digitized by Google

Dunkerque. On peut les produire artificiellement, en exposant à l'ardeur du soleil une longue barre de fer noircie, ou en faisant chauffer inférieurement une plaque de tôle horizontale, et regardant par une de ses extrémités des objets peu élevés au-dessus de l'autre. Les inflexions que les rayons de lumière éprouvent en traversant l'atmosphère, dont la densité près de la surface de la terre varie inégalement dans les lieux voisins par l'inégalité d'échauffement du sol, produisent souvent des phénomènes singuliers, qu'on expliquerait facilement en examinant les circonstances locales. Quelquefois l'image unique est seulement relevée ; d'autres fois, on aperçoit deux images symétriques par rapport à une ligne horizontale ou verticale.

1489. *Arc-en-ciel.* L'arc-en-ciel est, comme on sait, une couronne présentant toutes les couleurs du spectre solaire, qui apparaît quand les rayons du soleil viennent frapper un nuage qui se réduit en eau, et que l'observateur tourne le dos au soleil. On aperçoit ordinairement deux arcs concentriques ; dans l'arc extérieur, les couleurs, en commençant par la partie la plus élevée, se succèdent dans l'ordre suivant : violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge ; dans l'arc intérieur, les couleurs suivent un ordre inverse. Le centre de l'arc-en-ciel est toujours placé sur la ligne qui passe par le centre du soleil et l'œil du spectateur. Le phénomène de l'arc-en-ciel s'observe aussi dans cette espèce de pluie artificielle que produisent les jets d'eau.

Il résulte des circonstances que nous venons de décrire que ce phénomène est dû à l'influence des gouttes d'eau sur les rayons solaires. Pour trouver en quoi elle consiste, considérons d'abord un seul rayon extrêmement délié de lumière homogène, et examinons sa marche dans une goutte d'eau sphérique ; au point d'incidence, une partie du rayon sera réfléchie, et une autre réfractée ; au point de rencontre du rayon réfracté avec la surface de la sphère, le rayon se divisera encore en deux autres, dont l'un sera réfléchi et l'autre réfracté, et ainsi de suite. Considérons maintenant un large faisceau de rayons incidents homogènes ; chacun d'eux éprouvera la même série de réflexions et de réfractions ; mais comme leurs premières incidences sur la goutte d'eau sont différentes, ils ne resteront pas parallèles, et les rayons qui sortiront après un même nombre de réflexions intérieures se disperseront dans tous les sens. Cependant leur écart ne sera point constant, et il est facile de prévoir que les rayons émergents seront sensiblement parallèles lorsque l'incidence sera telle que la déviation des rayons émergents sur le rayon incident soit un maximum ou un minimum : car c'est une propriété générale des quantités qui passent par un maximum ou un minimum de n'éprouver que de faibles variations dans le voisinage de ces états ; par conséquent, les rayons incidents qui seront très-voisins de celui qui correspond au maximum ou au minimum de déviation produiront des rayons émergents sensiblement parallèles. Donc si on conçoit un faisceau de rayons parallèles qui viennent frapper la moitié de la surface d'une sphère liquide, tous les rayons émergents, après un même nombre de réflexions, formeront un faisceau dont les rayons se disperseront dans tous les sens, excepté ceux qui correspondent au maximum ou au minimum de déviation, qui seront sensiblement parallèles. Ces derniers seuls seront appréciables à l'œil, parce que cet organe ne peut pas être affecté par des rayons isolés ; c'est pour cette raison que Newton les a nommés *rayons efficaces*.

Dans ce qui précède, nous avons supposé les rayons homogènes ; mais s'ils étaient formés de lumière blanche, chaque rayon, en pénétrant dans la sphère liquide, se décomposerait, chaque rayon élémentaire suivrait une marche différente, et chaque système de rayons d'une même teinte donnerait un rayon efficace distinct, car la direction de ce rayon dépend de la réfrangibilité, et nous savons qu'elle varie avec la couleur. On trouve par le calcul que les rayons efficaces de lumière rouge dont

l'indice de réfraction est 108/81, correspondants à une seule réflexion intérieure dans une sphère d'eau, ont une incidence de 39°30′, et une déviation de 42°1′; que pour deux réflexions intérieures l'incidence est de 71°49′55″, et la déviation de 50°38′30″; que pour les rayons violets extrêmes, dont l'incidence de réfraction est de 109/81, pour une réflexion intérieure l'incidence est de 38°40′0″, la déviation de 40°17′, et pour deux réflexions l'incidence est de 71° et la déviation de 54°9′. Les incidences et les déviations des rayons intermédiaires seront évidemment comprises entre ces limites.

On peut aussi déterminer la position des rayons efficaces par de simples considérations de symétrie. Soit $MBDE$ (*fig.* 906) la section de la goutte d'eau par le plan mené par l'œil du spectateur et le centre du soleil. Pour qu'un rayon $ABab$ devienne efficace après une seule réflexion, il faut que le faisceau réfracté converge en un point D de la circonférence : car alors, par la réflexion, il forme un faisceau DeE symétrique au faisceau BbD, et qui, en repassant dans l'air, produit un faisceau $EeFf$ de rayons parallèles.

Pour que le faisceau $ABab$ (*fig.* 907) devienne efficace après deux réflexions, il faut que les rayons deviennent parallèles après la première réflexion : car le faisceau $EeFf$ sera symétrique au faisceau $BbdD$, et par conséquent le faisceau émergent sera composé de rayons parallèles. Il est facile de voir que, pour qu'un faisceau devienne efficace après trois réflexions (*fig.* 908), il faut que la seconde réflexion ait lieu en un seul point De même, pour qu'ils deviennent efficaces après quatre réflexions, ils doivent devenir parallèles après la seconde. Pour sortir parallèles après cinq réflexions, ils doivent concourir en un seul point de la circonférence après la seconde réflexion. En général, pour devenir efficaces après p réflexions, il suffit qu'ils soient parallèles après $\frac{p}{2}$ réflexions si p est un nombre pair, et qu'ils concourent sur la circonférence après $\frac{p-1}{2}$ réflexions si p est impair.

Cela posé, reprenons le cas de la figure 906; représentons par a l'angle d'incidence abc', par b l'angle de réfraction cbD et par n l'indice de réfraction. Le rayon incident ab, se mouvant parallèlement à lui-même d'une quantité infiniment petite, prend la position AB, et l'angle d'incidence devient ABc''; l'accroissement infiniment petit de l'angle d'incidence que nous représenterons par di est mesuré par l'arc Bb, et l'accroissement dr de l'angle de réfraction, étant égal à l'angle BDb, est mesuré par la moitié de l'arc Bb : on a donc dans ce cas

$$di = 2dr.$$

Dans le cas de deux réflexions (*fig.* 907), le faisceau $dDeE$ est formé de rayons parallèles : on aura donc

$$Dd = Ee, \quad \text{mais} \quad BD = DE \quad \text{et} \quad bd = de;$$

donc
$$bd - BD = de - DE = 2Dd.$$

Or
$$bd - BD = Bb - Dd;$$

donc enfin
$$Bb = 3\,Dd.$$

Dans ce cas on a
$$di = Bb, \quad dr = \frac{Bb - Dd}{2} = Dd,$$

et par conséquent
$$di = 3dr.$$

Pour le faisceau qui doit devenir efficace après trois réflexions, on trouverait

$$di = 4dr;$$

et en général, pour le faisceau qui doit devenir efficace après p réflexions, on trouverait

$$di = (p + 1)\,dr.$$

Digitized by Google

Mais on a $$\sin i = n \sin r, \qquad (1)$$

et, en différenciant. $$\cos i\, di = n \cos r\, dr:$$

donc $$(p+1)\cos i = n \cos r. \qquad (2)$$

En combinant les équations (1) et (2) on en déduit

$$\sin i = \pm\sqrt{1 - \frac{n^2-1}{p(p+2)}}, \quad \sin r = \pm\frac{1}{n}\sqrt{1 - \frac{n^2-1}{p(p+2)}}.$$

Les angles i et r étant connus, il est facile d'en déduire les angles que les rayons efficaces font avec les rayons incidents : en effet, soient SA (*fig.* 909) la direction des rayons incidents, FB celle des rayons émergents, on a

$$AOC = \pi - i - ACO,$$

or $$ACO = \frac{ACF}{2} = \frac{ACD}{2}(p+1) \quad \text{et} \quad ACD = \pi - 2r;$$

donc $$AOF = 2AOC = 2r(p+1) - 2i - \pi(p-1).$$

Cette valeur de AOF ne renfermant que la quantité p et les angles i et r, il s'ensuit que l'angle des rayons solaires et des rayons efficaces ne dépend que de la couleur des rayons et du nombre de réflexions. Pour déterminer les valeurs numériques de l'angle AOF, il faut faire $n = \frac{4}{3}$ pour les rayons rouges, et $n = \frac{109}{81}$ pour les rayons violets : on trouve ainsi les valeurs que nous avons données précédemment.

M. Babinet a trouvé qu'en désignant par d la déviation AOF, on pouvait éliminer les angles i et r, et qu'on obtenait pour la déviation relative à une seule réflexion

$$\sin^2\frac{d}{2} = \frac{(4-m^2)^3}{27m^4},$$

et pour cette relative à deux $\sin\frac{d}{2} = \frac{m^4+18m^2-27}{8m^2}$.

Supposons maintenant dans l'air un grand nombre de globules d'eau se succédant rapidement dans leur chute: tout se passera comme si chacun d'eux était immobile. Considérons seulement d'abord les rayons envoyés par le centre du soleil, que nous pouvons, sans erreur appréciable, considérer comme parallèles; soit O (*fig.* 910) la position de l'œil : si nous menons la ligne OC parallèle aux rayons solaires, et la droite OV faisant avec OC un angle de 40°17′, il est évident que les gouttes d'eau qui se trouveront dans cette direction enverront à l'œil des rayons efficaces violets, après une seule réflexion intérieure. En menant de même les lignes OR, OV', OR', de manière que $ROC = 42°2'$, $R'OC = 50°59'$, et $V'OC = 54°9'$, l'œil recevra suivant OR des rayons efficaces rouges après une seule réflexion intérieure, et suivant OR' OV' des rayons rouges et violets après deux réflexions intérieures; et, dans les directions comprises entre VO et RO, $V'O'$ et $R'O'$ les rayons efficaces des couleurs intermédiaires. Ainsi, s'il n'y avait qu'une série verticale de globules d'eau, l'œil apercevrait deux spectres très-minces, dont les teintes se succéderaient en sens contraire et dont le plus élevé aurait une intensité moindre que celui qui est inférieur, à cause de la double réflexion intérieure qu'ont éprouvée les rayons qui le forment. Mais si l'espace occupé par les globules a une étendue suffisante, ces spectres auront lieu dans tous les plans passant par OC et se trouveront à la même distance angulaire

Digitized by Google

de OC: par conséquent, l'œil apercevra deux systèmes de bandes circulaires colorées, ayant pour centre le point C, dont les rayons violets formeront les cercles extérieurs et intérieurs. Le diamètre apparent de la bande colorée intérieure sera égal à 42°2′ — 40°17′ ou 1°45′; celui de la bande extérieure de 54°9′ — 50°58′ ou de 3°11′, et la distance des deux bandes sera 50°59′—42°2′ ou 8°57′.

Dans ce qui précède, nous avons supposé que le soleil n'était qu'un point; mais il n'en est pas ainsi, son diamètre apparent est d'environ 30′ : par conséquent chaque point du soleil formera un arc-en-ciel ayant les dimensions déterminées plus haut, et c'est la superposition de tous ces arcs partiels qui ne coïncident pas qui formera l'arc observé. Pour déterminer les dimensions de cet arc total, observons que les arcs qui sont produits par les points de la circonférence du soleil ont leur centre sur la ligne menée par l'œil et par chacun de ces points : par conséquent, tous les arcs formés par la surface du soleil auront leur centre dans le cercle qu'on décrirait autour du point C, et dont le diamètre apparent serait égal à celui du soleil. Ainsi la bande violette résultant d'une seule réflexion intérieure sera formée par tous les cercles ayant leurs centres dans la surface du cercle CC' et qui auront pour demi-diamètre apparent 40°17′; or il est évident (*fig.* 910 A) que cette bande aura pour épaisseur 30′, ainsi que toutes les autres : il résulte de là que le cercle extérieur sera plus grand de 15′ que celui qui correspond au centre du soleil, et que le cercle intérieur sera plus petit de la même quantité. On aura donc pour les différents éléments les valeurs suivantes :

$$ROC = 42°2' + 15' = 42°17',$$
$$ROV = 40°17' - 15' = 40°2',$$
$$R'OC = 50°59' - 15' = 50°44',$$
$$V'OC = 54°9' + 15' = 54°24'.$$

Il est facile de déduire de là que l'épaisseur de l'iris intérieur sera de 2°15′, celle de l'iris extérieur de 3°40′, et la distance des iris de 8°27′. On prévoit aisément qu'à cause de la largeur de chaque bande colorée et de leur superposition dans chaque iris, leurs couleurs seront beaucoup moins vives que dans la supposition où le corps éclairant serait réduit à un point.

Toutes les circonstances que nous venons de décrire sont d'accord avec l'observation; Newton, en mesurant les diamètres apparents des différents cercles colorés d'un arc-en-ciel, a trouvé exactement les nombres indiqués par la théorie.

1490. On peut facilement produire les franges colorées qui correspondent aux arcs-en-ciel de différents ordres avec un cylindre de verre de 10 millimètres de diamètre, éclairé par des rayons solaires ou la lumière d'une bougie : la première frange se trouve déviée de 20°, et la seconde à peu près de 90°; M. Babinet est parvenu à voir distinctement la septième frange. On peut également observer les franges sur des veines liquides cylindriques et verticales.

1491. M. Babinet a produit les franges correspondantes aux arcs-en-ciel de différents ordres avec des cylindres de cristaux biréfringents; les arcs du premier ordre seulement étaient doubles; d'où il suit que les rayons extraordinaires s'affaiblissent par des réflexions successives plus que les rayons ordinaires, ce qui s'accorde très-bien avec la théorie des ondulations, comme nous le verrons plus loin. Il résulte de la formule de M. Babinet (page 479) qui donne la valeur de la déviation d pour l'arc du premier ordre que cette valeur deviendrait imaginaire pour le diamant, car pour cette substance on a $m > 2$.

1492. Il résulte de la théorie de l'arc-en-ciel que l'intensité de la lumière des

Digitized by Google

bandes colorées est d'autant plus grande que les globules d'eau ont un plus grand diamètre, car les sections des rayons efficaces augmentent avec ces diamètres; c'est d'ailleurs ce que M. Babinet a vérifié par l'expérience. On conçoit alors pourquoi les petits globules d'eau qui constituent les nuages ne produisent pas d'arcs-en-ciel.

1493. Indépendamment des arcs de différents ordres dus aux réflexions successives de la lumière dans les gouttes d'eau, il existe d'autres arcs qu'on a désignés sous le nom de *secondaires* ou de *surnuméraires :* on ne les aperçoit que rarement ; ils sont au nombre de 4 ou 5 qui bordent les limites intérieure et extérieure de l'arc-en-ciel du premier ordre. On peut facilement les reproduire au moyen d'un filet d'eau vertical d'un millimètre de diamètre. Les arcs secondaires proviennent des interférences des rayons qui ont éprouvé des déviations égales de part et d'autre du minimum.

1494. Lorsqu'on observe des arcs-en-ciel en pleine mer, et que sa surface est calme, les rayons solaires réfléchis ont la même direction que si le soleil était au-dessous de l'horizon de la même quantité dont il le dépasse, et par conséquent les rayons réfléchis produisent des arcs par réflexion dont le centre est élevé au-dessus de l'horizon. Les arcs directs et indirects se coupent deux à deux à l'horizon.

1495. La lumière de la lune produit aussi des arcs-en-ciel, mais les teintes en sont faibles et sans éclat.

1496. C'est à Descartes qu'on doit l'explication de l'arc-en-ciel ; c'est lui qui le premier détermina par le calcul la marche des rayons à travers une goutte d'eau, reconnut et détermina la position des rayons efficaces ; mais comme alors il ignorait l'inégale réfrangibilité des rayons différemment colorés, il ramena le phénomène de la coloration à ceux qui se produisent dans le prisme ; enfin, il vérifia sa théorie par des expériences directes, en faisant arriver des rayons lumineux dans une chambre obscure sur une sphère de verre pleine d'eau.

1497. *Couronnes.* On désigne sous le nom de couronnes des cercles concentriques au soleil ou à la lune, au nombre de 3 ou 4, dont le diamètre intérieur du plus petit varie de 1°, 5 à 4° ; dans tous ces cercles le rouge est extérieur et le violet en dedans ; en les observant avec des verres de couleur, Yong a reconnu que les diamètres croissent comme les nombres 1, 2, 3, 4, etc. ; cette loi a été vérifiée récemment par M. Delezène et par M. Babinet. La variation des diamètres des anneaux de même rang et de même teinte dans différentes couronnes, et les lois que suivent les diamètres des anneaux de même couleur dans une même couronne, ne permettent pas de douter que ces phénomènes ne soient de même nature que les anneaux qu'on observe en regardant une lumière à travers un verre couvert de lycopode, et qu'ils ne soient produits par de petits globules d'eau d'un diamètre uniforme.

1498. *Halos.* On désigne sous le nom de *halos* deux anneaux colorés intérieurement en rouge, concentriques au soleil, et dont les demi-diamètres apparents sont de 22° et 44°. Mariotte avait supposé que, quand les halos se formaient, il existait dans l'atmosphère une multitude de petits prismes de glace, disposés dans toutes les directions possibles dont les faces étaient inclinées de 60° ; alors, il y en avait qui se trouvaient placés de manière que les rayons solaires qui les traversaient arrivaient à l'œil sous la déviation minimum : ces rayons analogues aux rayons efficaces de l'arc-en-ciel produisaient le premier halos. On trouve en effet que son demi-diamètre apparent est de 22°, et que le rouge est en dedans, conformement à l'expérience. M. Arago a fait une nouvelle vérification de l'hypothèse de Mariotte, qui la rend bien plus probable encore. Si le cercle coloré provient réellement de réfraction à travers des prismes dont la section principale passe par le soleil, la lumière émergente doit être polarisée partiellement et

Digitized by Google

dans un plan perpendiculaire au rayon du cercle : or l'expérience a parfaitement confirmé cette indication de la théorie.

D'après Cavendisch, les prismes de glace sont terminés par des faces perpendiculaires aux arêtes, et le halos extérieur provient de la refraction minimum entre les faces latérales et les bases. En partant de cette hypothèse, on trouve pour le diamètre du halos un nombre peu different de celui qui résulte de l'observation.

M. Brewster a produit artificiellement des cercles colorés jouissant de toutes les propriétés des halos, en regardant une lumière à travers une plaque de verre, sur laquelle il avait fait cristalliser une couche mince de dissolution d'alun.

1499. *Parhélies.* Les halos sont quelquefois accompagnés d'un cercle blanc horizontal passant par le soleil, et ayant pour largeur son diamètre apparent; sur la circonférence de ce cercle et un peu en dehors du halos, se trouvent des images colorées du soleil; sur le même cercle horizontal et au point opposé à celui qu'occupe le soleil, on aperçoit une image de cet astre (*anthélie*); il se produit aussi quelquefois une bande blanche verticale qui passe par le soleil, et qui, avec le cercle horizontal, forme une croix blanche; enfin, on voit quelquefois dans les points des halos les plus voisins de la verticale de l'observateur des arcs de cercles colorés adossés aux halos, et dont les centres sont en dehors. Ce phénomène, dans toute sa complication, ne se montre que rarement. M. Babinet en a expliqué la plupart des particularités, en suivant l'hypothèse de Mariotte.

Admettons l'existence des prismes de glace dans l'atmosphère. Ceux dont l'axe sera allongé devront tomber de manière que leurs arêtes soient verticales, à cause de la résistance de l'air; ceux au contraire qui seront très-aplatis tomberont en ayant les faces des bases verticales : ainsi un grand nombre auront des faces verticales. Mais ces faces réfléchiront la lumière du soleil, et les images seront toutes dans un plan horizontal passant par le centre du soleil, et situées à la même hauteur au-dessus de l'horizon : ainsi, l'observateur verra un cercle blanc horizontal passant par le soleil, et ayant son diamètre pour épaisseur. M. Babinet a réalisé le phénomène dont il est question en regardant une lumière avec un cristal fibreux (topaze, tourmaline, diopside, gypse, etc.), taillé perpendiculairement aux fibres. On aperçoit un cercle lumineux qui passe par l'image du point lumineux, et dont le diamètre est d'autant plus grand que le cristal est plus incliné sur la direction du faisceau de lumière; l'effet produit est le même que quand on regarde une lumière au moyen d'un très-court cylindre creux de verre noirci extérieurement. Si, au moyen d'un bel échantillon de cristal fibreux ou d'un petit tube de verre, on regarde l'image du soleil transmise par un prisme, on obtient des anneaux colorés d'un grand éclat.

M. Babinet regarde les parhélies latéraux comme provenant des rayons qui ont éprouvé le minimum de déviation dans des prismes verticaux, qui sont plus nombreux dans cette position que dans toute autre, et explique ainsi pourquoi les écarts des parhélies sont d'autant plus éloignés du halos de 22° que l'astre est plus élevé au-dessus de l'horizon, attendu qu'à mesure que le soleil s'élève, la réfraction minimum est plus oblique à la section principale, et par suite plus grande.

M. Babinet attribue la bande blanche verticale qui passe par le soleil à des prismes de glace de peu de hauteur, dont l'axe devient horizontal à cause de la résistance de l'air : alors les prismes dont l'axe sera en même temps perpendiculaire au plan vertical qui passe par l'observateur et le soleil réfléchiront des images qui formeront une bande verticale lumineuse passant par le soleil. Les cercles tangents et l'image du soleil sur le point opposé du cercle horizontal n'ont point encore été expliqués.

1500. *Aurore boréale.* L'aurore boréale apparaît à l'horizon du côté du nord, en tirant un peu vers l'ouest, trois ou quatre heures après le coucher du soleil. Elle

Digitized by Google

s'annonce d'abord par une espèce de brouillard, sous la forme d'un segment de cercle dont la corde s'appuie sur l'horizon; les contours du segment paraissent bientôt bordés d'arcs concentriques lumineux, séparés par des bandes obscures. La partie obscure du segment lance des jets de lumière qui se renouvellent avec une extrême rapidité, et se dirigent vers le zénith, où ils forment une couronne enflammée; le phénomène a alors acquis son plus grand éclat; il diminue ensuite graduellement, les jets de lumière deviennent plus rares, la lumière se concentre vers le nord, et enfin disparaît. La lumière des aurores boréales n'a pas toujours le même éclat; elle s'affaiblit quelquefois pendant des heures entières de manière à devenir à peine visible, puis elle augmente subitement. La lumière est diffuse, et a beaucoup d'analogie avec celle de l'électricité dans le vide. Les aurores boréales sont d'autant plus visibles qu'on s'approche davantage des pôles : dans les îles Schetland, en Laponie, dans la Sibérie, elles ont beaucoup d'éclat. Ce singulier phénomène paraît être lié au magnétisme terrestre, car on a observé 1° que le centre des arcs concentriques était sur le méridien magnétique; 2° que le point où les rayons lumineux partis de l'horizon se réunissent est précisément celui vers lequel se dirige l'aiguille d'inclinaison; 3° que l'aurore boréale agit sur l'aiguille aimantée, même quand elle n'est pas visible dans le lieu où se trouve l'aiguille. M. Arago a démontré ce fait par un grand nombre d'observations, et il doit être rangé parmi les faits les mieux établis. Quelques physiciens ont nié l'influence observée par M. Arago; mais les expériences sur lesquelles ils se fondaient avaient été faites dans des lieux où les anomalies journalières de l'aiguille ne permettaient pas d'apprécier les perturbations dont il est question. Plusieurs physiciens ont essayé de donner une explication des aurores boréales, mais aucune n'est satisfaisante.

1501. *Étoiles filantes aérolithes.* On désigne sous le nom d'*étoiles filantes* des points lumineux qui se meuvent rapidement dans l'atmosphère en laissant une longue traînée de lumière semblable à celle des fusées à baguettes. Des observations simultanées, faites en 1823 dans plusieurs villes d'Allemagne, semblent indiquer que certaines étoiles filantes se trouvent à plus de 200 lieues au-dessus de la surface de la terre, et que la vitesse de translation, ordinairement opposée au mouvement de translation de la terre dans son orbite, s'élève quelquefois à 12 lieues par seconde; enfin un grand nombre d'apparitions d'étoiles filantes ont eu lieu dans différents points de la terre, dans différentes années, du 11 au 13 novembre.

Les *aérolithes* sont des masses caverneuses, vitrifiées à leur surface, d'un volume plus ou moins considérable, qui se précipitent de l'atmosphère. Les observations de chute d'aérolithes sont tellement nombreuses qu'il est impossible de conserver le moindre doute sur ce fait.

On a trouvé à la surface de la terre des masses isolées dont la composition chimique a la plus grande analogie avec celle des aérolithes, et qu'on regarde comme ayant la même origine. Ces masses renferment cependant du fer à l'état métallique, tandis que les aérolithes dont on a observé la chute ne contiennent ce métal qu'à l'état d'oxyde; mais on attribue cette différence à celle des masses. On pense que le métal s'est brûlé dans le trajet à travers l'atmosphère, mais que la combustion n'a pu être complète qu'autant que les masses ne dépassaient pas une certaine limite.

On regarde comme très-probable que les étoiles filantes sont des aérolithes qui s'enflamment dans l'atmosphère; quant à l'origine même des aérolithes, tout porte à croire qu'un grand nombre de petits corps circulent autour du soleil comme les planètes, qu'il en existe un groupe dont l'orbite traverse celle de la terre au point où se trouve cette planète, du 11 au 13 novembre, et que ces corps ne deviennent visibles que quand ils pénètrent dans l'atmosphère de la terre, où ils s'enflamment.

Digitized by Google

§ XI. *Sources de la lumière.*

1502. Parmi les corps célestes, il n'y a que le soleil et les étoiles qui soient lumineux par eux-mêmes; les planètes ne le sont que par réflexion. La lumière que la terre reçoit du soleil est beaucoup plus grande que celle qu'elle reçoit des étoiles, probablement à cause de sa proximité comparée à celle de ces dernières. Mais indépendamment des sources de lumière dont nous venons de parler et qui paraissent permanentes, il en existe encore deux autres que nous sommes libres de produire à volonté : c'est l'électricité et une température très-élevée. Nous avons déjà suffisamment parlé de la première, nous donnerons seulement quelques détails sur la seconde.

1503. Il paraît qu'en général, toutes les fois que la température d'un corps dépasse 500°, il devient lumineux; ce phénomène tendrait à faire penser que la lumière et la chaleur sont le résultat des vibrations d'un seul et même fluide, mais beaucoup plus rapides pour la lumière que pour la chaleur, et que certaines circonstances peuvent augmenter ou diminuer la rapidité des vibrations, et transformer la chaleur en lumière et la lumière en chaleur obscure. Quoi qu'il en soit, il résulte du fait que nous avons énoncé que tous les moyens artificiels propres à dégager de la chaleur, lorsqu'ils pourront atteindre ou dépasser la limite de température que nous avons assignée, produiront en même temps un dégagement de lumière. Ainsi, le frottement, le choc et les actions chimiques sont aussi des sources de lumière. Parmi les actions chimiques, la combustion est la seule que l'on emploie pour produire de la lumière artificielle; nous donnerons ici quelques détails sur les appareils d'éclairage.

Les corps qui sont fixes, c'est-à-dire qui, aux températures que nous pouvons produire, conservent l'état liquide ou solide, ne développent que peu de lumière par leur combustion dans l'air, même quand les produits de la combustion sont volatils; mais les gaz en produisent beaucoup quand ils tiennent en suspension des corps solides très-divisés. L'hydrogène carboné est dans ce cas, parce qu'une partie du carbone qu'il contient se dépose par la chaleur : ce gaz est réellement, comme nous allons le voir, le seul corps combustible employé pour produire de la lumière.

Les corps dont on se sert pour l'éclairage sont les matières grasses végétales ou animales, et le gaz hydrogène carboné provenant de la distillation de la houille, des huiles ou des résines. Lorsque les matières sont solides, on en forme des cylindres dont l'axe est occupé par une matière solide très-poreuse, qu'on nomme mèche; lorsque la mèche est enflammée, elle fond la matière solide à une distance plus ou moins considérable, la matière liquéfiée monte dans la mèche par la capillarité, se décompose par la chaleur qu'elle y éprouve, et donne naissance à un dégagement de gaz hydrogène carboné, qui en brûlant produit la flamme. On peut observer ce dégagement de gaz en éteignant la flamme d'une bougie, de manière que l'extrémité de la mèche reste encore incandescente : on aperçoit une fumée blanche très-combustible. Dans les lampes alimentées par des matières liquides, l'huile s'élève dans la mèche, y éprouve la même décomposition qui produit le même effet. Quant aux appareils dans lesquels on brûle le gaz hydrogène carboné, ils consistent en un petit réservoir percé d'un ou de plusieurs orifices plus ou moins capillaires par lesquels s'échappe le gaz et qu'on enflamme à sa sortie. Ainsi, dans tous ces modes d'éclairage, la flamme est produite par la combustion du gaz hydrogène carboné; ce gaz est préparé d'avance dans les nouveaux systèmes d'éclairage, et il se forme dans la mèche lorsque l'on emploie des matières combustibles solides ou liquides.

Les appareils dont nous venons de parler sont les plus simples; mais ils ont

Digitized by Google

souvent l'inconvénient de ne pas brûler la totalité des gaz qui se dégagent, et par conséquent de donner de la fumée, souvent d'une odeur désagréable, et de consommer infructueusement une partie de la matière combustible. Argand est parvenu, au moyen d'une disposition très-simple, et maintenant généralement usitée, à faire disparaître complètement ces inconvénients. Les becs des lampes d'Argand sont formés de deux tuyaux cylindriques concentriques; l'intervalle que les sépare, fermé inférieurement, communique avec le réservoir d'huile; dans cet intervalle, on place une mèche circulaire qui monte ou descend à l'aide d'une crémaillière; le courant d'air arrive et par le cylindre intérieur et autour du cylindre extérieur. On conçoit que, par cette disposition, la flamme étant très-mince et enveloppée par deux courants d'air, la combustion doit être beaucoup plus complète; mais elle est rendue beaucoup plus vive au moyen de la cheminée de verre qui entoure la flamme : le courant d'air devient plus rapide par le tirage qu'elle produit, et le coude que renferme la cheminée, en réfléchissant de la chaleur sur la flamme elle-même, contribue à favoriser la combustion. Quand les proportions du bec, la distance du niveau de l'huile dans le réservoir à l'extrémité du bec, celle de l'extrémité de la mèche au coude de la cheminée, et la hauteur de la cheminée, sont convenables, la combustion a lieu à distance du sommet du bec; elle ne donne aucune fumée et produit le maximum de lumière que l'on peut obtenir de l'huile consommée. La mèche et la cheminée pouvant se mouvoir facilement, on peut toujours les placer de la manière la plus avantageuse. Dans les appareils où l'une quelconque de ces conditions n'est pas remplie, au bout d'un certain temps la mèche se charbonne, il se dégage de la fumée et la lumière diminue. Les réservoirs à niveau constant et les lampes hydrostatiques, que nous avons décrits dans le premier volume, satisfont parfaitement à la condition de la permanence de hauteur de l'huile dans le bec. Dans les lampes de Carcel, l'huile est sans cesse injectée dans la mèche par de petites pompes placées dans le pied de la lampe et qui sont mues par un mouvement de pendule que l'on remonte tous les jours. Ces lampes sont supérieures à toutes les autres.

Nous avons déjà dit précédemment qu'on obtenait une lumière d'une vivacité extraordinaire en plaçant un cylindre de chaux carbonatée dans un courant de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène enflammé, et une lumière moins vive, mais cependant encore très-grande, en plaçant dans la flamme d'alcool des morceaux de papiers imprégnés d'une dissolution d'hydrochlorate de chaux ou de magnésie.

Lorsque la lumière doit être portée sur une certaine étendue, on emploie des miroirs disposés de manière à diriger sur cet espace celle qui se porterait dans toute autre direction. Quand la lumière doit franchir une grande distance, on rend les rayons parallèles par des miroirs ou des lentilles.

1504. Il existe un grand nombre de corps qui émettent de la lumière dans des circonstances particulières, sans que cette émission de lumière soit accompagnée de la haute température que développe la combustion. Cette lumière, qui a beaucoup d'analogie avec celle de l'électricité, et surtout avec celle que produit la combustion lente du phosphore, a été désignée sous le nom de *lumière phosphorique*.

Certains corps peuvent devenir phosphorescents par la chaleur, l'insolation, le frottement ou la percussion, et les décharges électriques; d'autres sont naturellement phosphorescents.

Lorsque les corps sont naturellement phosphorescents, et que, s'ils sont organiques, ils n'appartiennent point à des corps vivants, par exemple, le phosphore, les bois et les poissons dans un certain état de décomposition, la phosphorescence paraît due à des actions chimiques lentes.

Digitized by Google

Plusieurs insectes, principalement le *lampyre*, jouissent de la propriété d'émettre de la lumière dans l'obscurité. La lumière du lampyre ne se manifeste point quand l'animal a été renfermé dans un lieu obscur ; lorsqu'on le chauffe graduellement, l'intensité de la lumière augmente progressivement jusqu'à 41°, et subsiste après la mort de l'animal ; en le jetant dans de l'eau à 50°, il meurt aussitôt, et produit beaucoup de lumière. La phosphorescence de la mer dans certaines localités paraît due à la présence d'un grand nombre de petits animalcules, et à des débris de matières organiques dans un certain état de décomposition.

§ XII. *Explication des phénomènes dans le système de l'émission.*

1505. Newton admet, comme nous l'avons déjà dit, que les corps lumineux lancent dans toutes les directions des molécules d'une ténuité extrême : un rayon de lumière est alors composé d'une suite de molécules qui se meuvent avec une égale vitesse suivant la même direction, et la vitesse de chaque molécule est égale à la vitesse réelle de la lumière. Ces molécules doivent être d'une ténuité excessive pour que leur choc, malgré leur énorme vitesse, ne blesse pas l'organe si délicat de la vision.

1506. Dans ce système, un rayon lumineux étant formé d'une série continue de molécules qui se meuvent en ligne droite avec la même vitesse, elles doivent être assez rapprochées pour tenir la rétine dans un état d'excitation permanente. Or, on peut facilement reconnaître par l'expérience que, pour obtenir une sensation continue, il suffit que la cause excitatrice se renouvelle huit à dix fois par seconde : alors l'effet produit à chaque apparition dure un temps plus long que celui qui la sépare de la suivante. On conçoit d'après cela que, pour produire un effet permanent, les molécules lumineuses qui constituent un même rayon peuvent être très-éloignées les unes des autres, et l'être inégalement, car il suffit qu'elles se succèdent à des intervalles plus petits que 1/10 de seconde : or, comme la lumière parcourt 70,000 lieues par seconde, la continuité de la sensation exigerait que leur distance ne dépassât pas 7,000 lieues. Cette observation fait voir comment les rayons de lumière peuvent se croiser dans toutes sortes de directions sans se troubler dans leur marche.

1507. Dans le système de l'émission, l'ombre formée sur les corps, celle qu'ils projettent derrière eux, les pénombres et le décroissement de l'intensité de la lumière, s'expliquent avec une extrême facilité.

1508. *Réflexion et réfraction.* Pour expliquer toutes les modifications que les corps font éprouver à la lumière, Newton admet que les molécules lumineuses éprouvent de la part des corps des actions qui ne se manifestent qu'à une très-petite distance, et dont les intensités et la nature varient suivant la nature du corps et les circonstances physiques dans lesquelles se trouvent les molécules lumineuses : les unes éprouvent une action répulsive, et peuvent être réfléchies quand la force répulsive est suffisante pour détruire la composante normale de sa vitesse d'impulsion ; les autres sont attirées et nécessairement transmises.

Nous allons maintenant examiner avec détail les phénomènes qui accompagnent la réflexion et la réfraction.

1509. Soient AB (*fig.* 911) une surface réfléchissante, m une molécule lumineuse, sur laquelle le corps AB exerce une force répulsive qui ne se manifeste qu'à une distance insensible. Si du point m, comme centre, on décrit une sphère avec un rayon égal à la distance d'affinité sensible, la molécule m sera repoussée par toutes les molécules du corps réflecteur renfermées dans cette sphère ; cette dernière ayant un rayon infiniment petit, on pourra considérer la partie de la surface qui agit sur la molécule lumineuse pendant son mouvement comme étant plane. Il en résulte

Digitized by Google

que, l'intensité de la force répulsive dépendant seulement de la distance, et la masse répulsive étant symétrique par rapport à la normale, la résultante totale des répulsions de toutes les molécules matérielles passera par la normale; et, comme cette normale ne changera pas sensiblement de direction par le déplacement de la molécule lumineuse, et que la même chose aura lieu tant que la molécule lumineuse sera à une distance des bords du corps plus grande que la distance d'affinité sensible, il s'ensuit évidemment que le rayon lumineux dans sa marche ne sortira pas du plan normal à la surface passant par le rayon incident, puisque ce plan renferme toutes les forces qui agissent : c'est la première loi de la réflexion.

Pour découvrir la seconde, considérons un rayon de lumière *MN* (*fig.* 912) arrivant sur une surface *AB*, sous l'incidence θ, et soit *ab* la limite de la distance à laquelle s'étendent les forces répulsives. Décomposons au point *N* la vitesse du rayon lumineux en deux autres, l'une dirigée suivant la normale, et que nous désignerons par *v*, l'autre parallèlement à *AB*, que nous désignerons par *h*. La résultante des forces émanées de *AB* étant verticale, la première vitesse seule sera altérée pendant que le rayon se rapprochera de *AB*, et la vitesse horizontale *h* restera constante; à mesure que la molécule lumineuse pénétrera dans l'espace *ABab*, sa vitesse verticale devenant de plus en plus petite, la direction du rayon s'inclinera toujours davantage sur *AB*, et il arrivera une époque où elle sera parallèle à *AB* ; ce sera l'instant où la vitesse verticale sera nulle. A partir de cet instant, les forces répulsives, agissant toujours dans le même sens, rendront à la molécule lumineuse une vitesse verticale en sens contraire qui croîtra de telle manière, qu'à des distances égales de *AB* les vitesses verticales deviendront les mêmes. Il suit nécessairement de là que la trajectoire curviligne *NN'* sera symétrique par rapport à la normale *xy* ; et, comme les composantes horizontales et verticales de la molécule aux points *N* et *N'* sont égales, il en résulte que les rayons incidents et réfléchis sont également inclinés sur la normale. Il faut remarquer que, dans ce système, le rayon pourrait pénétrer dans le corps à une certaine profondeur et être encore réfléchi. En effet, soit *a'b'* (*fig.* 913) une surface intérieure, distante de la surface *AB* d'une quantité égale à la distance de répulsion sensible; soit *m* une molécule lumineuse qui a traversé la surface *AB* : tant que cette molécule n'aura pas atteint *a'b'*, elle éprouvera une action répulsive, car, si l'on décrit autour d'elle la sphère de répulsion sensible, il est évident que les forces répulsives des parties *x* et *y* se détruisent, et qu'il reste celles de la partie *z*. Ainsi les forces répulsives se manifestent depuis la limite extérieure *ab* jusqu'à la limite intérieure *a'b'* ; mais elles croissent de *ab* jusqu'à *AB*, et décroissent de *AB* à *a'b'*, et une molécule peut être réfléchie dans tout l'espace compris entre ces limites. Il est évident, d'après ce qui précède, que pour le même corps la réflexion aura lieu à une distance de *a'b'* d'autant plus grande que le rayon sera plus incliné sur la surface, car alors les forces répulsives ont une plus petite composante verticale à détruire.

Dans ce système, on conçoit facilement pourquoi la réflexion est d'autant plus abondante que les rayons sont plus inclinés, parce que les composantes verticales que les forces répulsives doivent détruire sont d'autant plus petites que les rayons sont plus inclinés. On rend facilement compte aussi de la réflexion régulière que produisent les corps dépolis sur les rayons très-inclinés : c'est qu'alors la réflexion a lieu près de la limite extérieure, que les sommets seuls des aspérités agissent, et qu'étant dirigés dans le même plan ils agissent comme un plan continu.

1510. Pour expliquer la réfraction, Newton admet, comme nous l'avons déjà dit, que les corps réfringents exercent sur certaines molécules de la lumière une attraction qui ne se manifeste qu'à des distances extrêmement petites, et qui croît à mesure que la distance diminue, suivant une loi quelconque, comme les forces répulsives,

Digitized by Google

qui, s'exerçant sur d'autres molécules, produisent la réflexion. Par les mêmes raisonnements que nous avons faits pour la réflexion, on trouve que la résultante de ces forces est toujours normale à la surface, du moins tant que la molécule lumineuse est à une distance sensible des bords du corps, et que ces forces doivent se manifester sur une molécule lumineuse dans l'espace $ab\,ab'$ (*fig.* 914), ab et ab' étant des surfaces parallèles à AB, et distantes de cette dernière d'une quantité égale à la distance d'attraction sensible. Il résulte de là que le rayon incident dans sa marche ne doit pas sortir du plan normal à la surface qui passe par sa direction, puisque ce plan renferme toutes les forces qui sollicitent les molécules lumineuses, et que leurs trajectoires ne sont curvilignes que dans l'espace $abab'$, au delà duquel elles continuent à se mouvoir en ligne droite et avec une vitesse constante; c'est la première loi de la réfraction. Quant à la permanence de l'indice de réfraction, on la déduit facilement de ce que la vitesse du rayon lumineux est constante avant son entrée dans la surface ab et après sa sortie de la surface $a'b'$, et de ce que les forces réfractives n'altèrent point la vitesse horizontale du rayon. En effet, soient v la vitesse primitive du rayon lumineux, et h la composante horizontale, V la vitesse du rayon lumineux dans le corps après qu'il a traversé la surface ab', h' sa composante horizontale, et enfin θ et θ' les angles d'incidence et de réfraction, on a évidemment $h = v \sin \theta$ et $h' = V \sin \theta'$, et puisque les composantes horizontales du rayon incident et du rayon réfracté sont égales, on a $\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{V}{v}$. Ainsi l'indice de réfraction est constant, et égal au rapport des vitesses de la lumière dans le corps et dans le vide. En poursuivant l'hypothèse de l'attraction des corps sur les molécules de la lumière, le calcul conduit aux circonstances les plus minutieuses des phénomènes observés.

1511. Supposons qu'un point m, se mouvant avec une vitesse u, soit soumis à une force accélératrice analogue à la pesanteur et dirigée dans le même sens : en désignant par g le double de l'espace parcouru pendant l'unité de temps, par v la vitesse après le temps t, par e l'espace parcouru pendant le même temps, nous aurons

$$v = u + gt, \quad \text{et} \quad e = ut + \frac{gt^2}{2}.$$

Substituant dans la seconde équation la valeur de t tirée de la première, il vient

$$v^2 = u^2 + 2ge.$$

Si la force accélératrice n'était pas constante, c'est-à-dire si les impulsions successives n'étaient pas égales, on pourrait toujours diviser l'espace que doit parcourir le point m sous son influence en un grand nombre de parties assez petites pour que l'on pût regarder la force accélératrice comme constante pendant qu'il traverse chacune d'elles : en appelant v' la vitesse à la fin de la seconde tranche, v'' la vitesse à la fin de la troisième, etc., V la vitesse finale, e l'épaisseur commune de ces tranches, g, g', g'', etc., les intensités des forces accélératrices correspondantes à chacune d'elles, on aura

$$v^2 - u^2 = 2ge,$$
$$v'^2 - v^2 = 2g'e,$$
$$v''^2 - v'^2 = 2g''e \ldots,$$
$$V^2 - v^{(n-1)^2} = 2g^{(n)}e.$$

Ajoutant toutes ces équations il vient

$$V^2 = u^2 + 2ge + 2g'e + 2g'' + \ldots$$

Digitized by Google

Supposons maintenant qu'une molécule lumineuse, se mouvant dans le vide avec une vitesse u, se présente à la surface d'un corps sous un angle θ. Désignons par θ' l'angle de réfraction, et par V la vitesse de la lumière dans le corps, la vitesse horizontale sera toujours

$$u \sin \theta;$$

et la vitesse verticale, qui, à l'entrée dans la limite supérieure, était $u \cos \theta$, sera à la surface même du corps

$$u^2 \cos^2 \theta + 2ge + 2g'e + 2g''e + \ldots,$$

et à la limite inférieure elle sera donnée par l'équation :

$$V^2 \cos^2 \theta' = u^2 \cos^2 \theta + 2 [2ge + 2g'e + 2g''e + \ldots];$$

car les valeurs de g, g', g'', sont les mêmes à des distances égales de la surface du corps, en dehors et en dedans. Si nous désignons par δ la densité du corps, par k un coefficient constant, nous pourrons poser

$$2ge + 2g'e + 2g''e + \ldots = \delta k^2,$$

et il viendra

$$V^2 \cos^2 \theta' = u^2 \cos^2 \theta + 2\delta k^2 \ldots (a)$$

Remarquons maintenant que nous avons pour la vitesse horizontale

$$V \sin \theta' = u \sin \theta;$$

en élevant cette équation au carré et l'ajoutant avec l'équation (a), il vient

$$V^2 = u^2 + 2\delta k^2.$$

Mais nous avons

$$V = nu,$$

donc

$$2\delta k^2 = u^2 (n^2 - 1).$$

La quantité $2\delta k^2 : u^2$, qui est proportionnelle à l'action du corps, est ce que Newton a désigné sous le nom de puissance réfractive, et $2k^2 : u^2$ est le pouvoir réfringent.

1512. Si un rayon de lumière se présentait à la seconde surface d'un corps pour sortir dans le vide (*fig.* 915), les actions émanées du corps agiraient en sens contraire; elles commenceraient à se manifester à la limite intérieure, et s'exerceraient jusqu'à ce que la molécule fût parvenue à la limite extérieure. A cette dernière limite la vitesse de la molécule serait $v^2 = V^2 - 2\delta k^2$, et on retrouverait la vitesse de la lumière dans le vide, puisque $2\delta k^2 = V^2 - u^2$.

Mais le rayon pourrait être assez incliné sur la surface d'émergence pour que l'action du corps détruisît la composante de sa vitesse perpendiculaire à la surface du corps avant que les molécules lumineuses eussent atteint la limite extérieure des forces : alors le rayon rentrerait dans l'intérieur du corps ; il éprouverait une véritable réflexion, et il est facile de voir, d'après ce qui précède, que l'angle d'incidence serait égal à l'angle de réflexion. Cette réflexion peut avoir lieu en un point quelconque de l'espace qui sépare les deux surfaces limites. Si on suppose que le rayon, d'abord perpendiculaire à la surface AB (*fig.* 916), s'incline toujours davantage sur cette surface, la réflexion commencera par se manifester sur la surface $a'b'$. A mesure que l'inclinaison augmentera, la réflexion se fera à une plus petite distance de ab, et quand le rayon sera parallèle à AB, la réflexion aura lieu à la limite intérieure des forces : car, à mesure que l'inclinaison augmente, la composante verticale devient plus petite, et l'action du corps la détruit à des distances plus petites de ab.

L'inclinaison du rayon sous laquelle la réflexion commence est donc déterminée par cette condition que la composante verticale soit nulle à la limite extrême : or, en désignant comme précédemment par V la vitesse dans l'intérieur du corps, et par θ l'angle du rayon avec la

Digitized by Google

normale à la surface d'émergence, la composante perpendiculaire à la surface d'émergence et à la limite intérieure sera $V \cos \theta$, et, à la limite extérieure $a'b'$, elle sera

$$\sqrt{(V^2 \cos^2 \theta - 2ik^2)}.$$

Alors, pour déterminer les valeurs de θ correspondantes, nous aurons les équations

$$V \cos \theta = 0 \quad \text{et} \quad V^2 \cos^2 \theta - 2ik^2 = 0.$$

La première donne $\theta = 90°$; pour avoir la valeur de θ, qui satisfait à la seconde, remarquons que $2ik^2 = u^2 (n^2 - 1)$, u étant la vitesse de la lumière dans le vide, et que $V = nu$; alors il vient

$$\cos^2 \theta = \frac{n^2 - 1}{n^2} = 1 - \frac{1}{n^2}, \quad \text{d'où} \quad \sin \theta = \frac{1}{n};$$

ce qui s'accorde avec la valeur de l'angle limite trouvée par l'expérience.

1513. Examinons maintenant le cas où la lumière passerait d'un milieu dans un autre. Soit AB (*fig.* 917) leur surface de séparation, ab et $a'b'$ deux surfaces distantes de AB d'une quantité égale à celle à laquelle se manifeste l'action des corps sur la lumière. Quand une molécule lumineuse aura passé au delà de la surface ab, elle sera sollicitée par le corps d'où elle tend à sortir, et par celui dans lequel elle tend à pénétrer; mais ces deux actions seront opposées et normales à la surface de séparation : ainsi le rayon réfracté restera dans le plan normal à la surface de séparation des deux milieux et passant par le rayon incident. Si on désigne par V et V' les vitesses de la lumière dans le premier et le second milieu, par θ et θ' les angles que fait avec la normale le rayon incident et le rayon réfracté, les composantes horizontales des vitesses seront $V \sin \theta$ et $V' \sin \theta'$; comme ces vitesses sont égales, on aura

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{V'}{V}.$$

Or, V' et V étant des quantités constantes, il en résulte que l'indice de réfraction est aussi constant, et qu'il est égal au rapport inverse des vitesses dans les deux milieux. Pour avoir le rapport de ces vitesses, désignons par $2ik^2$ l'effet que produirait le premier milieu sur un rayon qui y pénétrerait en sortant du vide, par $2i'k'^2$ l'effet analogue produit par le second milieu : on aura

$$V'^2 = V^2 - V^2 2ik^2 + 2i'k'^2, \quad \text{d'où} \quad \frac{V'^2}{V^2} = 1 - \frac{2ik^2 - 2i'k'^2}{V^2}.$$

Remarquons maintenant que, u représentant la vitesse de la lumière dans le vide, et n, n', les indices de réfraction pour le vide et chacun des milieux, on a

$$V^2 = u^2 + 2ik^2, \quad 2ik^2 = u^2 (n^2 - 1) \quad \text{et} \quad 2i'k'^2 = u^2 (n'^2 - 1) :$$

alors il vient

$$\frac{V'^2}{V^2} = 1 - \frac{u^2 (n^2 - n'^2)}{n^2 u^2} = \frac{n'^2}{n^2}, \quad \text{d'où} \quad \frac{V'}{V} = \frac{n'}{n}.$$

Ainsi l'indice constant de réfraction, pour le passage de la lumière d'un milieu dans un autre, est égal au rapport de l'indice de réfraction par rapport au vide du second et du premier milieu.

Pendant que la molécule lumineuse traverse l'espace qui sépare les deux limites ab et ab', la composante de la vitesse perpendiculairement à la surface de séparation des deux milieux croît d'une manière continue de

$$V \cos \theta \quad \text{à} \quad \sqrt{V^2 \cos^2 \theta - 2ik^2 + 2i'k'^2}.$$

Digitized by Google

L'angle θ peut être tel, que cette vitesse devienne nulle lorsque la molécule a pénétré à une certaine profondeur au-dessous de la limite ab : alors il est évident que la molécule sera réfléchie vers le premier milieu, de manière que l'angle de réflexion soit égal à l'angle d'incidence et que la réflexion aura lieu à une distance de ab d'autant plus grande que l'angle θ sera plus petit. Si on suppose que le rayon, d'abord perpendiculaire à la surface de séparation des deux milieux, s'incline vers cette surface, la réflexion commencera à avoir lieu sur la limite extérieure $a'b'$, et l'angle d'incidence du rayon sera déterminé par l'équation

$$V^2 \cos^2 \theta - 2ik^2 + 2i'k'^2 = 0.$$

Pour en déduire la valeur de θ il faut remarquer qu'on a

$$V^2 = u^2 + 2ik, \quad 2ik^2 = u^2(n^2 - 1) \text{ et } 2i'k'^2 = u^2(n'^2 - 1):$$

Alors on trouve

$$\cos^2 \theta = 1 - \frac{n'^2}{n^2}, \quad \text{d'où} \quad \sin \theta = \frac{n'}{n}.$$

Mais, si la réflexion avait lieu à la surface de séparation des deux milieux, l'angle d'incidence θ serait donné par l'équation

$$V^2 \cos^2 \theta - ik^2 + ik'^2 = 0;$$

d'où l'on tirerait

$$\cos^2 \theta = \frac{n^2 - n'^2}{2n^2}, \quad \text{d'où} \quad \sin^2 \theta = \frac{n^2 + n'^2}{2n^2}.$$

Quand le second milieu est opaque, on admet que la réflexion ne commence qu'à la surface de séparation des deux milieux, et c'est par conséquent cette dernière valeur de θ qu'il faut prendre pour l'angle limite.

1514. *Décomposition de la lumière par réfraction.* Newton admet, comme l'expérience le démontre, que les rayons de lumière blanche sont formés de rayons parallèles de couleur variable et inégalement réfrangibles : il en résulte alors qu'ils sont séparés par tous corps réfringents, mais ne restent séparés, après leur émergence, qu'autant que la surface de sortie n'est point parallèle à la face d'incidence.

1515. *Décomposition de la lumière par des lames minces.* L'explication de ces phénomènes singuliers repose sur la théorie des *accès de facile réflexion et de facile transmission*, que nous allons indiquer.

Newton suppose 1° que toutes les molécules lumineuses reçoivent, à l'instant de leur émission, des dispositions à être facilement réfléchies et réfractées, qui se succèdent alternativement après des temps égaux : or, comme la vitesse de la lumière est uniforme, ces intermittences se succèdent après des chemins parcourus égaux, de sorte que sur la route d'une molécule lumineuse se trouvent des distances égales, entre lesquelles la molécule est successivement dans des dispositions à la réflexion et à la réfraction; ces successions d'état sont désignées sous le nom d'*accès;* la distance parcourue par la molécule entre les retours consécutifs de la même phase de deux accès de même nature s'appelle *intervalle des accès;* ces derniers intervalles sont évidemment doubles de la longueur d'un accès; 2° que chaque molécule lumineuse passe d'une manière continue d'un accès à un autre, par la diminution progressive de la faculté réfléchissante ou réfractive; 3° que la longueur des accès varie lorsque la lumière passe perpendiculairement d'un corps dans un autre, suivant le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction; 4° que, dans le cas d'une réfraction oblique, les longueurs des accès varient suivant une loi dont il a donné l'expression analytique; 5° que, quand des rayons lumineux se réfléchissent à la seconde

Digitized by Google

surface d'un corps, ils reprennent après la réflexion, et à partir de la surface réfléchissante, de nouveaux accès dont les longueurs sont les mêmes que si, venant du milieu extérieur, ils étaient entrés avec l'obliquité que leur imprime la réflexion; 6° que les accès des rayons varient avec leurs couleurs : ils sont, pour le rayon rouge extrême, pour la limite de l'orangé et du rouge, du jaune et de l'orangé, du vert et du jaune, du bleu et du vert, de l'indigo et du bleu, du violet et de l'indigo, et pour le violet extrême, proportionnels aux racines cubiques des nombres

$$1,\ {}^8/_9,\ {}^5/_6,\ {}^3/_4,\ {}^2/_3,\ {}^3/_5,\ {}^9/_{16},\ {}^1/_2.$$

Au moyen de ces nombreuses hypothèses, toutes calquées sur les lois des phénomènes, on parvient à les expliquer. Nous n'entrerons pas dans tous ces détails, attendu que la théorie de Newton est insuffisante : elle ne rend compte que des phénomènes pour lesquels elle a été faite; tous les autres lui échappent. Nous citerons par exemple les anneaux réfléchis à centres blancs (1379).

1516. *Double réfraction et polarisation.* Pour expliquer la double réfraction, on a admis qu'indépendamment des forces réfractives ordinaires qui se manifestent sur toutes les molécules qui pénètrent dans le corps, un certain nombre d'entre elles étaient sollicitées par des forces répulsives ou attractives dirigées perpendiculairement à l'axe du cristal. M. de Laplace, en soumettant cette hypothèse au calcul, en a déduit la construction d'Huyghens, et M. Ampère, en supposant les molécules lumineuses soumises à des forces émanées de plusieurs axes, a été conduit à une construction analogue à celle d'Huyghens, mais beaucoup plus générale.

Quant à la polarisation de la lumière, voici de quelle manière on a essayé d'en rendre compte. Nous avons déjà vu que dans le système de l'émission les différentes faces des molécules ne jouissent pas des mêmes propriétés physiques : les unes sont favorables au développement des forces réfléchissantes, les autres aux forces réfractives. Dans un rayon de lumière naturelle, les molécules sont disposées de toutes les manières possibles, et c'est pourquoi, à la rencontre d'un corps, il y a des molécules réfléchies et d'autres réfractées; mais, comme un rayon polarisé est entièrement absorbé ou entièrement réfléchi dans certaines directions, on a été conduit à admettre que, dans un rayon polarisé, toutes les faces homologues des molécules étaient parallèles.

1517. Pour expliquer la coloration de la lumière polarisée quand elle traverse les lames minces cristallisées, M. Biot suppose que, lorsqu'un faisceau de lumière polarisée traverse un cristal doué de la double réfraction, et dont la section principale n'est ni parallèle ni perpendiculaire au plan primitif de polarisation, *les axes des molécules lumineuses*, d'abord dirigés suivant ce plan, éprouvent, en pénétrant dans le cristal, des oscillations qui les portent alternativement à droite et à gauche de la section principale, tantôt dans le plan primitif, tantôt dans un plan situé de l'autre côté, à la même distance angulaire. M. Biot suppose que les oscillations se répètent un très-grand nombre de fois avant que les molécules lumineuses éprouvent la polarisation fixe qui range leurs axes parallèlement et perpendiculairement à la section principale : il faut une épaisseur de plusieurs millimètres, et même de plusieurs centimètres, suivant cet habile physicien, pour que la polarisation mobile se change en polarisation fixe dans le cristal de roche ou la chaux sulfatée, du moins tant que le parallélisme des faces d'entrée et de sortie empêche la séparation des faisceaux ordinaires et extraordinaires, qui est toujours accompagnée de polarisation fixe. Mais, lorsque les faces sont parallèles, et que l'épaisseur de la plaque n'excède pas celles que nous venons d'indiquer, les molécules lumineuses qui l'ont traversée, au lieu d'être polarisées suivant la section principale et la direction perpendiculaire,

Digitized by Google

le sont dans le plan primitif ou dans l'azimuth $2i$, selon que la dernière oscillation de leurs axes les portait vers le premier ou le dernier plan, et soit qu'elle fût achevée ou seulement commencée au moment de leur sortie; au moins, selon M. Biot, se comportent-elles toujours, dans le rhomboïde qui sert à analyser la lumière émergente, comme si leur dernière oscillation avait été terminée. La durée de ces oscillations, ou l'épaisseur de cristal dans laquelle chacune d'elles s'exécute, est constante pour les molécules lumineuses de même nature, mais elle varie d'une espèce à l'autre proportionnellement aux longueurs d'accès.

Mais Fresnel a démontré, par des expériences multipliées, que nous rapporterons, que les deux faisceaux dans lesquels la lumière se divise en traversant une lame mince sont toujours polarisés suivant la section principale et le plan perpendiculaire, et que, dans les phénomènes de coloration que présentent les lames minces, la polarisation apparente suivant le plan primitif ou l'azimuth $2i$, et seulement dans certaines circonstances, résulte de la réunion des faisceaux qui constituent les images ordinaires et extraordinaires.

1518. *Diffraction.* Pour expliquer la propagation curviligne de la lumière au delà du corps éclairé, Newton supposait que les rayons qui passent à une certaine distance des bords d'un corps sont détournés de leur direction par une force répulsive émanée du corps; cette action ayant d'autant plus d'influence que les rayons s'approchent davantage du corps, les rayons diffractés se coupent deux à deux, et forment une surface caustique (*fig.* 917 *A*) suivant laquelle se propage la lumière au delà du corps. Newton avait essayé d'expliquer les franges extérieures par des mouvements sinueux qu'il supposait aux molécules lumineuses dans le voisinage des corps; mais cette explication ne pourrait point s'appliquer aux franges intérieures. C'est une chose singulière que, quoique les franges intérieures aient été observées et décrites par Grimaldi, et quoique Newton ait fait des observations sur des corps très-étroits (des cheveux) qui produisent des franges intérieures avec une grande netteté, ces franges intérieures aient échappé à ce grand physicien. Nous n'insisterons pas sur l'explication de Newton, parce qu'elle est insuffisante. Les phénomènes de diffraction sont ceux qui fournissent les arguments les plus concluants contre le système de l'émission.

1519. On voit, d'après tout ce que nous venons de dire, qu'il n'y a réellement que la reflexion et la réfraction qui s'expliquent d'une manière précise dans le système de l'émission, et encore il faut admettre que toutes les molécules d'une même teinte sont également attirées ou repoussées; mais, si on fait intervenir les accès de facile réflexion et de facile transmission, l'intensité de la force dépendra des phases d'accès dans lesquelles se trouveront les molécules à l'instant où elles arriveront à la distance à laquelle ses forces s'étendent, et par conséquent l'indice sera variable. Pour tous les autres phénomènes, il faut pour chacun d'eux de nouvelles hypothèses, et on peut dire que la théorie ne satisfait aux phénomènes que comme une formule empirique aux faits qui ont servi à la déterminer; en outre, la coloration de la lumière polarisée par les lames cristallisées n'est point expliquée, car l'ingénieuse théorie de la polarisation mobile ne s'accorde point avec les faits; et enfin les phénomènes de la diffraction sont non-seulement inexplicables dans ce système, mais en opposition manifeste avec l'hypothèse principale, qui repose sur une action des corps et de la lumière ne se manifestant qu'à une très-petite distance : en effet, les bandes diffractées ayant une courbure très-sensible sur une étendue de plusieurs mètres, et cette inflexion de la lumière étant indépendante de la nature des corps que rase la lumière, on ne peut pas admettre que ces phénomènes soient dus à une action de ces corps, car elle varierait avec leur nature. Mais le fait le plus remarquable est la formation

Digitized by Google

des bandes obscures par l'action de deux faisceaux, car il en résulte que de la lumière ajoutée à de la lumière produit de l'obscurité : or, dans le système où la lumière est due à des particules lumineuses, deux faisceaux réunis doivent toujours augmenter l'intensité de la lumière.

§ XII. *Système des ondulations.*

1520. Le système des ondulations a été imaginé par Descartes, et plus habilement suivi dans ses conséquences mathématiques par Huyghens et Euler. Le système de l'émission, soutenu par le nom de Newton, l'avait fait abandonner ; mais dans ces derniers temps, les découvertes de Yong et de Fresnel, et surtout celles de ce dernier, ont porté dans ce système une clarté et une précision qui lui donne un haut degré de probabilité.

Constitution des ondes, principe des interférences.

1521. Dans le système des ondulations on admet que l'espace et les intervalles des molécules des corps sont remplis d'un fluide impondérable très-élastique, désigné sous le nom d'éther. Dans le vide, ainsi que dans un même corps homogène, la densité et l'élasticité de l'éther sont les mêmes dans tous les points, mais elles changent avec la nature du corps, et dans les corps cristallisés l'élasticité de l'éther n'est pas la même dans toutes les directions.

1522. Les corps lumineux produisent de la lumière, comme les corps sonores produisent le son ; et l'éther propage les ondes lumineuses, comme l'air propage les ondes sonores.

Les vibrations moléculaires des corps lumineux étant isochrones, tout ce que nous avons dit des ondes sonores est applicable aux ondes lumineuses. Aussi, chaque onde lumineuse est composée de deux demi-ondes égales, dans lesquelles les mouvements de l'éther sont de signes contraires ; la longueur d'une onde est égale à la vitesse de propagation du mouvement dans l'éther, en prenant pour unité de temps la durée d'une vibration du corps lumineux ; les ondes peuvent avoir des intensités et des longueurs différentes, l'intensité étant proportionnelle à l'amplitude des oscillations ou à la vitesse de l'éther.

1523. Mais il y a entre la nature des ondes sonores et celle des ondes lumineuses une différence essentielle : dans les premières, les mouvements ont lieu dans la direction même de la propagation, c'est-à-dire perpendiculairement à la surface des ondes ; tandis que dans les dernières, le mouvement a lieu perpendiculairement à la propagation, c'est-à-dire parallèlement à la surface des ondes. Nous examinerons d'abord comment ces derniers mouvements peuvent se propager, et ensuite comment les vibrations des corps lumineux peuvent les produire.

Considérons dans un fluide élastique trois files indéfinies parallèles et consécutives de points matériels. Si l'on suppose entre ces molécules une certaine loi de répulsion, elles affecteront, dans l'état d'équilibre et de repos absolu, un arrangement régulier d'après lequel elles seront également espacées sur les trois rangées, et celles de la file intermédiaire répondront, je suppose, aux milieux des intervalles compris entre les molécules des deux autres. Nous n'indiquons cette disposition particulière que pour fixer les idées, car il est clair qu'elle ne saurait avoir lieu suivant toutes les directions. Mais quelle que soit celle des files que l'on considère dans le milieu élastique, leurs points matériels tendront toujours à se placer dans les positions relatives qui amènent l'équilibre stable. Supposons donc que cette condition soit satisfaite : si l'on dérange

Digitized by Google

un peu la file intermédiaire en la faisant glisser sur elle-même, mais seulement d'une quantité très-petite par rapport à l'intervalle de deux molécules consécutives, et qu'ensuite on la laisse libre, chacun de ses points matériels reviendra vers sa première situation (indépendamment de ce qui se passe aux extrémités de la rangée, puisque nous la supposons indéfinie), et oscillera de part et d'autre comme un pendule qui a été écarté de la verticale. Mais si on avait assez éloigné ces molécules de leurs points de départ pour les placer exactement vis-à-vis les molécules des deux autres rangées (supposées immobiles), il en serait résulté un nouvel équilibre. Faisons encore glisser la file intermédiaire jusqu'à ce que ses points matériels répondent de nouveau aux milieux des vides des deux autres, et elle rentrera dans un troisième état d'équilibre semblable au premier. On voit qu'en continuant à la faire glisser dans le même sens, elle serait en équilibre à chaque demi-intervalle des molécules, et n'éprouverait ainsi que dans les positions intermédiaires l'action des forces retardatrices, dont l'effet serait compensé, après chaque instant très-court, par des forces accélératrices qui leur succéderaient.

Nous avons supposé, pour simplifier les idées, que les deux tranches voisines de la tranche intermédiaire restaient en repos pendant que celle-ci glissait sur elle-même. Il est clair que les choses ne se passent pas de cette manière, et qu'une tranche ne peut pas se déplacer sans mettre en mouvement les tranches voisines. La rapidité plus ou moins grande avec laquelle le mouvement se propage dépend de l'énergie de la force accélératrice qui tend à ramener les tranches contiguës dans les mêmes positions relatives, et des masses de ces tranches, comme la vitesse de propagation des ondes sonores de l'air (telles qu'on les conçoit ordinairement) dépend du rapport entre sa densité et la résistance qu'il oppose à la compression. Il est évident qu'on peut appliquer à ces nouvelles oscillations perpendiculaires aux rayons les mêmes raisonnements et les mêmes calculs qu'à celles où le mouvement oscillatoire s'exécute suivant les directions de propagation.

1524. On peut se rendre compte de l'origine des vibrations transversales en remarquant que, quand une molécule est ébranlée dans une direction quelconque, ce petit mouvement est en général incliné sur la ligne qui joint cette molécule à la plus voisine, et peut toujours être décomposé en trois autres petits mouvements rectangulaires, dirigés, l'un suivant la plus courte distance à la molécule voisine, et les deux autres perpendiculairement à cette direction. Alors la première composante produira des mouvements de condensation et de dilatation, analogues à ceux que l'on considère dans les ondes sonores, et les deux autres des petits mouvements perpendiculaires aux premiers, et qui seront en même temps perpendiculaires à la direction de la propagation. Ainsi l'ébranlement d'un fluide devrait donner naissance à trois systèmes d'ondes : dans l'un le mouvement se transmettrait par des compressions et des dilatations successives, et dans les deux autres par de petits déplacements des molécules sans variation de densité. Il faudrait alors admettre que l'oreille ne peut être ébranlée que par les ondes qui se propagent par des condensations et des dilatations, que pour l'œil c'est le contraire, et que les effets qui seraient produits par les autres systèmes d'ondes nous sont inconnus.

De la constitution des ondes, indépendamment de la direction du mouvement vibratoire, résulte une conséquence importante découverte par Yong, et qui est connue sous le nom de *principe des interférences;* nous l'exposerons avec tous les détails nécessaires.

1525. *Principe des interférences.* Nous avons vu qu'un mouvement oscillatoire isochrone produit dans le milieu élastique environnant une série d'ondes de mêmes longueurs, composées de demi-ondes dans lesquelles les mouvements sont égaux,

Digitized by Google

mais de signes contraires. Il résulte de là que, si deux systèmes d'ondes, ayant la même longueur d'ondulation, et de même intensité, se propagent dans le même sens, et si l'un d'eux est en retard sur l'autre d'une demi-ondulation ou d'un nombre quelconque impair de demi-ondulations, tous les mouvements se détruiront; mais que, si la différence de marche est égale à un nombre pair de demi-longueur d'ondulation, elles concourront toutes deux à imprimer à l'éther des mouvements dans le même sens, et leurs effets s'ajouteront. Si les intensités des deux systèmes d'ondes n'étaient pas égales, il est évident que dans le premier cas les vitesses ne se détruiraient pas; il se produirait un système d'ondes résultantes dans lesquelles la vitesse de l'éther serait égale à la différence des vitesses dans les deux ondes composantes.

Si les ondes, toujours de même longueur et de différentes intensités, différaient de marche d'une quantité qui ne serait pas un multiple d'une demi-ondulation, l'effet produit serait un système d'ondes de même longueur que les ondes composantes, mais dans lesquelles la vitesse de l'éther et la position par rapport aux ondes composantes dépendraient des intensités des ondes composantes et de leur différence de marche, comme on peut le voir dans l'article suivant.

1526. Nous avons vu, page 299 du 1er volume, qu'en désignant par v la vitesse de l'air, à un instant t, à une distance x du centre d'ébranlement, et par λ la longueur d'une onde condensée ou dilatée, on avait

$$v = A \sin \pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right).$$

La même formule sera applicable à la lumière; mais nous prendrons pour unité de temps la durée d'une vibration complète du corps lumineux, et pour λ la longueur totale de l'onde résultante des deux oscillations contraires du corps lumineux : alors t sera deux fois plus petit, λ deux fois plus grand, et la formule drviendra

$$v = A \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right).$$

A l'aide de cette formule on peut facilement calculer la vitesse qu'acquiert une molécule d'éther, par un nombre quelconque d'ondes qui se meuvent parallèlement et qui ont la même longueur.

Nous désignerons par a et a' les intensités des ondes élémentaires, par u et u' les vitesses que chacun des faisceaux imprimerait séparément à la molécule d'éther, par V la vitesse qu'elle éprouve par le concours des deux faisceaux, par x la distance du premier centre d'ébranlement, et enfin par c l'intervalle qui sépare les points correspondants des deux ondes élémentaires; nous aurons :

$$u = a \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right), \quad u' = a' \sin 2\pi \left(t - \frac{x+c}{\lambda}\right) \quad \text{et} \quad V = u + u';$$

Ainsi, $V = a \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) + a' \sin 2\pi \left(t - \frac{x+c}{\lambda}\right)$,

$$= a \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) + a' \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) \cos 2\pi \frac{c}{\lambda} - a' \cos 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) \sin 2\pi \frac{c}{\lambda},$$

$$= \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) \left(a + a' \cos 2\pi \frac{c}{\lambda}\right) - a' \cos 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda}\right) \sin 2\pi \frac{c}{\lambda}.$$

Digitized by Google

Posons $$a + a' \cos 2\pi \frac{c}{\lambda} = A \cos i \ldots, \qquad (a)$$

et $$a' \sin 2\pi \frac{c}{\lambda} = A \sin i \ldots, \qquad (b)$$

il viendra $$V = A \sin \left[2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda} \right) - i \ldots \right] \qquad (c)$$

Si nous faisons $2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda} \right) - i = 2\pi t'$, d'où $t' = t - \frac{x}{\lambda} - \frac{i}{2\pi}$,

ce qui ne fait que changer l'origine du temps, il vient

$$V = A \sin 2\pi t'.$$

La valeur de V prend alors la même forme que celle de u et de u', et on voit qu'elle éprouve des variations périodiques qui se succèdent à des intervalles égaux à l'unité de temps : ainsi l'onde résultante est une onde de la même longueur que les ondes composantes, et ayant une certaine intensité A. Pour obtenir cette intensité élevons séparément au carré les équations (a) et (b), et faisons-en la somme, il viendra

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2aa' \cos 2\pi \frac{c}{\lambda}.$$

Quant à la position de l'onde résultante, on la trouvera facilement en mettant l'équation (c) sous la forme

$$V = A \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda} - \frac{i}{2\pi} \right) = A \sin 2\pi \left(t - \frac{x}{\lambda} - \frac{\lambda i}{2\pi} \cdot \frac{1}{\lambda} \right):$$

car, en la comparant aux équations qui donnent les valeurs de u et de u', on voit facilement que l'onde résultante est éloignée de la première de $\frac{\lambda i}{2\pi}$, et de la seconde de $c - \frac{\lambda i}{2\pi}$. Il résulte de là et de la valeur de A une conséquence très-remarquable : la valeur de A donnée par l'équation (d) est la résultante de deux forces, a et a', qui font entre elles un angle $2\pi \cdot \frac{c}{\lambda}$; et, d'après l'équation (b), l'angle i est l'angle formé par la résultante avec la première composante : celui de la résultante avec la seconde composante est alors $c \cdot 2\pi \frac{c}{\lambda} - i$. Or, ces angles et l'angle des deux composantes $2\pi \frac{c}{\lambda}$ sont dans les mêmes rapports que les distances des ondes élémentaires à l'onde résultante et entre elles; et il résulte de là une construction géométrique très-simple pour trouver l'onde résultante et sa position par rapport aux ondes composantes. Si on trace deux lignes faisant entre elles un angle égal à $2\pi \frac{c}{\lambda}$, et ayant pour longueurs a et a', la diagonale représentera l'intensité de l'onde résultante, et les arcs compris entre ces trois lignes les positions relatives des trois systèmes d'ondes.

S'il y avait un nombre quelconque d'ondes parallèles, la même méthode conduirait facilement à la détermination de l'onde résultante.

1527. Les interférences ne pourront se manifester que quand les ondes auront exactement la même longueur; mais, si chacun des systèmes d'ondes en renfermait plusieurs dont les longueurs d'ondulations différassent très-peu les unes des autres, quelque légère que fût cette différence, quand elle serait répétée un grand nombre de fois, elle produirait nécessairement une opposition dans les modes d'interférence

Digitized by Google

des différents systèmes : l'affaiblissement des uns se trouverait compensé par le renforcement des autres, et par conséquent les effets d'interférence disparaîtraient. On voit alors que les phénomènes d'interférence ne pourront se manifester dans la lumière en apparence la plus homogène qu'autant que la différence de marche ne contiendra pas un trop grand nombre d'ondulations.

1528. Enfin il est une dernière condition nécessaire à la manifestation des phénomènes d'interférence et dont nous n'avons point encore parlé : c'est que les rayons soient partis d'une source commune. En effet, tout système d'ondes qui en rencontre un autre exerce toujours sur lui la même influence quand leurs positions relatives sont les mêmes, soit qu'ils émanent d'une source commune ou de sources différentes : car il est clair que les raisonnements par lesquels nous avons expliqué leur influence mutuelle sont également applicables aux deux cas. Mais il ne suffit pas que cette influence existe pour qu'elle soit sensible à nos yeux ; il faut encore que ses effets soient permanents, et c'est ce qui ne peut avoir lieu lorsque les deux systèmes d'ondes qui interfèrent émanent de sources différentes. En effet, les particules des corps lumineux dont les vibrations ébranlent l'éther doivent éprouver de fréquentes perturbations dans leurs oscillations, en raison des changements rapides qui s'opèrent autour d'elles, ce qui peut néanmoins très-bien se concilier avec l'émission régulière d'un grand nombre d'ondulations dans chacune des séries séparées par ces perturbations. Cela posé, on ne peut admettre que ces perturbations s'opèrent simultanément et de la même manière dans des particules séparées et indépendantes; en sorte qu'il arrivera, par exemple, que les oscillations de l'une seront retardées d'une demi-oscillation complète, tandis que celles de l'autre continueront sans interruption, ou seront retardées d'une oscillation entière, ce qui changera du tout au tout les effets d'interférence des deux systèmes d'ondes qu'elles produisent : car il y avait accord parfait entre les mouvements dans le premier cas, et il y aura discordance complète dans le second. Or, ces effets opposés, se succédant avec une extrême rapidité, ne produiront sur l'œil qu'une sensation continue, qui sera moyenne entre les sensations plus ou moins vives qu'ils exciteraient séparément, et qui restera constante, quelle que soit la différence des chemins parcourus.

Il n'en est pas de même lorsque les deux faisceaux émanent d'une source commune : alors les deux systèmes d'ondes qui sont partis d'un même centre de vibrations, éprouvant des perturbations de la même manière et au même instant, n'en reçoivent aucun changement dans leurs positions relatives; en sorte que, s'ils discordaient complètement d'abord, ils continueront à se trouver en discordance complète; et si les mouvements s'accordaient, le même accord subsistera toujours, tant que le centre de vibration enverra de la lumière. Ainsi, dans ce cas, les effets seront constants et deviendront perceptibles. C'est un principe qui s'applique à tous les effets produits par les combinaisons des ondes lumineuses; ils ne peuvent être sensibles que lorsqu'ils sont permanents.

1529. Jusqu'à présent, nous avons supposé que les deux systèmes d'ondes marchaient suivant la même direction, et qu'en conséquence, leurs mouvements oscillatoires s'exécutaient aussi suivant une direction commune, soit dans le même sens, soit en sens opposé : c'est le cas le plus simple d'interférence et le seul dans lequel il puisse y avoir destruction totale du mouvement par un autre, car il faut pour cela, non-seulement que les forces soient égales et en sens contraires, mais encore qu'elles agissent suivant la même ligne droite, c'est-à-dire, en un mot, qu'elles soient directement opposées.

Dans le cas où les rayons qui interfèrent forment entre eux des angles sensibles, mais très-petits, les impulsions apportées dans les mêmes points de l'éther par les

Digitized by Google

deux systèmes d'ondes se croisent aussi sous des angles sensibles; mais à cause de la petitesse de ces angles, la résultante des deux impulsions est presque exactement égale à leur somme lorsque les impulsions agissent dans le même sens, et à leur différence lorsqu'elles agissent en sens contraire : ainsi, dans les points d'accord ou de discordance, l'intensité de la lumière sera la même que si les deux faisceaux lumineux avaient suivi la même direction; mais les variations d'intensité n'auront lieu qu'aux points de croisement des rayons.

Considérons, par exemple, deux points lumineux voisins, d'où partent simultanément des ondes de même intensité et de même longueur : dans tous les points de l'espace pour lesquels la différence des distances aux deux points lumineux sera égale à un nombre impair de demi-longueurs d'ondulations, la lumière sera détruite; elle sera au contraire à son maximum à tous les points pour lesquels la différence des distances sera un nombre pair de demi-longueurs d'ondulations. Ainsi les lieux obscurs et éclairés formeront des hyperboloïdes de révolution autour de la ligne qui joint les points lumineux, dont les points lumineux seront les foyers, et dont la différence des rayons vecteurs sera pour les points obscurs, $\frac{1}{2}\lambda$, $\frac{3}{2}\lambda$, $\frac{5}{2}\lambda$, etc., et pour les points lumineux, λ, 2λ, 3λ, 4λ, etc. Si les points étaient remplacés par des lignes lumineuses parallèles, les points obscurs et lumineux formeraient des cylindres hyperboliques qui projetteraient sur un écran parallèle aux lignes lumineuses des franges parallèles sensiblement équidistantes.

1530. Voici maintenant l'expérience de Fresnel, qui démontre l'exactitude de toutes ces déductions théoriques.

Soient ED et DF (*fig.* 918) deux miroirs plans métalliques ou de glace noircie inférieurement, réunis en D sous un angle très-voisin de 180°, et placés dans une chambre obscure; S un point lumineux formé au foyer d'une lentille d'un très-court foyer, éclairée par le soleil. Il est évident que, si du point S on abaisse deux perpendiculaires SP et SQ sur les deux miroirs, et qu'on prenne $BQ = SQ$ et $PA = SP$, les rayons réfléchis sur les deux miroirs étant prolongés iront passer par les points A et B, et par conséquent on pourra ne point avoir égard aux miroirs et considérer les rayons comme émanant des points A et B : les chemins parcourus seront les mêmes, car, d'après la construction précédente, pour deux rayons quelconques SG et SH, on a

$$SGb = BGb \text{ et } SHb = AHb.$$

Les deux systèmes d'ondes pouvant être considérés comme émanant des points A et B, seront terminés par des surfaces sphériques ayant pour centre ces points; et tout ce que nous avons dit précédemment sur les effets résultant de l'interférence des ondes émanées de deux points devra se réaliser, si notre théorie est exacte : or il résulte de l'expérience que, si on reçoit sur un écran la lumière réfléchie par les miroirs, quand elle est homogène, l'image est formée de bandes hyperboliques alternativement brillantes et obscures, à égales distances les unes des autres, et dirigées perpendiculairement à la ligne qui joint les deux images des points lumineux. La bande centrale est très-brillante, elle est placée entre deux bandes obscures du noir le plus foncé; mais, à mesure que les bandes s'écartent du centre, leur vivacité diminue. Ce phénomène a lieu quelle que soit la teinte de la lumière, mais les largeurs des bandes sont différentes. La lumière blanche donne des bandes irisées par la superposition partielle des bandes de différentes couleurs. Ainsi la vérification est complète.

Cette expérience donne le moyen de mesurer les longueurs d'ondulation des

Digitized by Google

rayons colorés avec une très-grande précision, en mesurant l'angle AbB et la distance des centres de deux franges quelconques; mais, avant de faire voir comment, nous avons quelques détails à donner sur différentes circonstances de l'expérience.

Le foyer lumineux doit être le plus petit possible, car chaque point mathématique du foyer forme un système de franges dont la position dépend de celle de ce point : par conséquent, si le foyer avait une étendue un peu considérable, les franges seraient diffuses. Pour que le rayon solaire puisse se prolonger suffisamment dans la chambre obscure, il faut le rendre horizontal à l'aide d'un miroir placé en dehors; et, quand on veut procéder à des mesures exactes des franges, il faut rendre la direction du rayon constante à l'aide d'un *héliostat* (1312). Nous avons dit que l'on recevait les franges sur un carton blanc, mais il est beaucoup plus avantageux de les regarder dans l'espace avec une loupe (1382). Pour mesurer les distances des franges, Fresnel se servait du micromètre décrit précédemment (1382).

1531. Revenons maintenant à la mesure des longueurs d'ondulations : dans la figure, les lignes hyperboliques br, $b'r'$, etc., représentent les lignes suivant lesquelles se propagent les franges brillantes, et les lignes no, no', etc., les directions des franges obscures; ainsi ib représente la longueur d'ondulation, et bb' la distance du milieu de la frange centrale au centre de la première frange brillante; le triangle $bb'i$ pouvant être considéré comme rectiligne à cause de la petitesse des arcs, et l'arc bi étant très-petit relativement à bb', on a sensiblement

$$bi = \delta = bb' \sin bb'i\,;$$

mais l'angle $bb'i$, ayant ses côtés perpendiculaires à ceux de l'angle AbB, lui est égal; et, en le désignant par i, il vient

$$bi = \delta = bb' \sin i.$$

D'après ce qui précède, bb' peut se mesurer avec une grande précision, et l'angle i peut s'obtenir directement au moyen d'un cercle répétiteur; c'est ainsi que Fresnel a obtenu les résultats suivants :

LIMITES des COULEURS PRINCIPALES.	VALEURS EXTRÊMES de d.	COULEURS PRINCIPALES.	VALEURS MOYENNES de d.
	mm.		mm.
Violet extrême	0,000406	Violet	0,000423
Violet-indigo	0,000439	Indigo	0,000440
Indigo-bleu	0,000459	Bleu	0,000475
Bleu-vert.	0,000492	Vert	0,000512
Vert-jaune	0,000552	Jaune	0,000551
Jaune-orangé	0,000571	Orangé	0,000583
Orangé-rouge	0,000596	Rouge	0,000620
Rouge extrême. . . .	0,000645		

Nous allons maintenant examiner successivement les différentes classes de phénomènes que présente la lumière, et exposer avec les détails nécessaires les explications qui en ont été données dans le système qui nous occupe.

Digitized by Google

Intensité, réflexion, réfraction, dispersion.

1532. *Intensité de la lumière.* Lorsqu'on considère la lumière comme se propageant par des mouvements ondulatoires, l'intensité doit varier comme celle du son, proportionnellement au carré de l'amplitude des oscillations; et comme il résulte du calcul que cette amplitude ou la vitesse d'oscillation diminue proportionnellement à la distance au centre d'ébranlement, il en résulte que l'intensité de la lumière varie en raison inverse du carré de la distance.

1533. *Réflexion.* Considérons d'abord un faisceau de rayons parrallèles ED et FG (*fig.* 919) partis d'un même centre d'ondulation, et soit GI un plan perpendiculaire à tous les rayons, et qui par conséquent représentera la direction de l'onde incidente; tous les points de rencontre des rayons avec la surface réfléchissante deviendront des centres de vibrations, les surfaces enveloppes de toutes ces ondes formeront évidemment l'onde réfléchie, et il suffira, pour en connaître la position, de déterminer celle d'une surface enveloppe quelconque. Cherchons la surface qui passe par le point D, c'est-à-dire l'onde réfléchie lorsqu'un certain mouvement dirigé suivant ED arrive en D; le mouvement correspondant propagé suivant FG est arrivé avant, et le point G a évidemment déjà produit une onde sphérique dont le rayon est ID. Le point qui serait au milieu de GD aura produit de même une onde sphérique dont le rayon est $\frac{1}{2}\,ID$, de sorte que, si on mène par le point D une droite CD symétrique à GI, les rayons des ondes partis de différents points de GD seront proportionnels aux distances de ces points à la ligne DC : ainsi le plan DC sera tangent à toutes ses ondes, et sera par conséquent la direction de l'onde cherchée. Il résulte évidemment de là les deux lois connues de la réflexion : car les rayons incidents et réfléchis sont perpendiculaires aux surfaces des ondes, et les rayons correspondants doivent passer par un même point de la surface réfléchissante.

Si les rayons partaient d'un point placé à une distance finie du miroir (*fig.* 920) tous les points de l'onde réfléchie devraient se trouver à la même distance du point o en passant par la surface réfléchissante ; d'où il suit évidemment que les ondes réfléchies seront des sphères ayant leur centre commun au point o', symétrique de o par rapport au miroir, et que les rayons incidents et réfléchis, placés dans des plans normaux, seront également inclinés sur sa normale.

Il est important de remarquer que tous les rayons qui partent de la surface réfléchissante dans d'autres directions que celle de la réflexion régulière se détruisent complétement par leur interférence. En effet, si on mène deux rayons quelconques Gk et Dl, Gc ne sera plus égal à ID, et on pourra toujours prendre GD tel que la différence des chemins soit égale à une demi-ondulation : alors les deux rayons Gk et Dl se détruiront mutuellement. Mais on conçoit que, si l'on supprimait Dl, la neutralisation n'aurait plus lieu et que le rayon Gk deviendrait visible. En général les rayons émanés du point D sous une incidence plus grande ou plus petite que celle de la réflexion régulière sont détruits par les rayons parallèles situés à droite et à gauche, et qui partent de points d'autant plus voisins du point D que leur obliquité est plus grande. En effet, si on désigne par i et r les angles d'incidence et de réflexion, pour que les rayons Gk et Dl se détruisent par leur interférence il faut que la différence des chemins $Gc - Dl = 1/2\,\lambda$; mais $GC = GD \sin r$, et $Dl = GD \sin i$: ainsi on a $GD\,(\sin r - \sin i) = 1/2\,\lambda$, et par conséquent GD sera d'autant plus petit que r diffèrera davantage de i. Il résulte de là que, quand les deux bords du miroir sont très-éloignés, il n'y a qu'une très-petite largeur vers les bords dont les rayons puis-

Digitized by Google

sent dévier, et ils ont une très-faible intensité, car ils sont en partie neutralisés par ceux de même inclinaison qui partent des points précédents. Ainsi le faisceau réfléchi aura sensiblement la forme et les dimensions du faisceau incident prolongé au delà de la surface réfléchissante. Mais si la largeur du miroir était très-petite, à mesure qu'elle diminuerait la neutralisation des rayons qui s'écartent de la direction correspondante à la loi serait moins complète, et l'intensité des rayons divergents irait en croissant. C'est ce que Fresnel a vérifié par l'observation que nous allons rapporter. Si on colle sur un miroir métallique deux bandes de papier noir, de manière à ne laisser à découvert qu'un espace triangulaire très-aigu, en éclairant cet espace par des rayons solaires et recevant l'image sur un carton à une grande distance, cette image paraît plus large dans les points correspondants aux parties les plus étroites du miroir; par conséquent, la divergence des rayons est d'autant plus grande que l'espace réfléchissant est plus étroit.

D'après ce qui précède, il est facile d'expliquer pourquoi les corps terminés par des surfaces non polies réfléchissent de la lumière dans toutes les directions, et pourquoi la quantité de lumière réfléchie régulièrement augmente avec l'inclinaison des rayons. En effet, quand un corps est terminé par une surface quelconque, tous les points de cette surface deviennent des centres de rayonnement; si la surface est polie, tous les rayons qui ne sont pas disposés symétriquement aux rayons incidents se détruisent par leur interférence; mais si la surface était parsemée de cavités ayant une grande profondeur relativement à la longueur d'une ondulation, et il suffit pour cela que ces profondeurs aient quelques dix millièmes de millimètres, les rayons partis de points voisins ne peuvent plus interférer, et par conséquent la lumière est réfléchie dans tous les sens. Mais à mesure que les rayons incidents s'inclinent davantage, ils pénètrent à des profondeurs décroissantes, et les phénomènes deviennent les mêmes que si on diminuait la hauteur des aspérités de la surface.

1534. *Réfraction*. Considérons d'abord un faisceau incident de rayons parallèles (*fig.* 921); GI étant un plan perpendiculaire au faisceau représentera le plan de l'onde incidente. Il est évident que quand un certain mouvement vibratoire arrivera au point D, le mouvement correspondant propagé suivant FG sera déjà arrivé au point G, et ce mouvement aura produit une onde sphérique dont le rayon sera égal à ID, multiplié par v'/v, v et v' étant les vitesses de la lumière dans le premier et le second milieu; le point m, milieu de GD, aura donné naissance à une onde dont le rayon sera deux fois plus petit; et comme les ondes parties des différents points de GD auront des rayons proportionnels à la distance de ces points au point D, il est facile de voir que ces ondes auront un plan DM tangent commun que représentera par conséquent la direction de l'onde réfractée; les normales aux ondes représentant les rayons, l'angle IGD est égal à l'angle d'incidence, et l'angle GDM est égal à l'angle de réfraction; mais on a $GD = ID : \sin i$, et $GD = GM : \sin r$, et par conséquent $ID : \sin i = GM : \sin r$; mais $GM = ID \times v'/v$ donc $v' \sin i = v \sin r$; ce qui est la loi de la réfraction. Quant à la première, savoir que les rayons incidents et réfractés sont dans un même plan normal, elle résulte évidemment de ce que les rayons sont perpendiculaires aux ondes, que ces ondes sont des surfaces planes, toutes les deux perpendiculaires au plan d'incidence, et que les rayons incidents et réfractés correspondants doivent passer par un même point de la surface du milieu réfringent.

Si le point lumineux était à une distance finie, on pourrait prendre des faisceaux assez petits pour que les rayons pussent être considérés comme parallèles : alors les lois de la réfraction seraient encore vraies pour chacun de ces faisceaux élémentaires; mais l'onde réfractée ne serait plus sphérique, comme l'onde incidente.

Il faut remarquer que la construction indiquée pour déterminer la position de

Digitized by Google

l'onde réfractée n'est possible qu'autant que GM est plus petit que GD, et c'est ce qui existe toujours quand le second milieu est plus réfringent que le premier : car alors GM est $<$ que ID, et ID est toujours $<$ que GD. Mais dans le cas contraire la réfraction pourra ne pas être possible, et, pour savoir quand cela arrivera, il faut remarquer que

$$GD = GM : \sin i = GM . n : \sin i :$$

ainsi, quand $n : \sin i$ sera $<$ que 1, c'est-à-dire quand $\sin i$ sera $>$ que n, la réfraction n'existera plus; ce qui est d'accord avec ce que nous savons déjà. Dans ce cas, n, est évidemment $<$ que 1.

On reconnaîtra facilement, par les mêmes raisonnements que pour la réflexion, que les rayons qui n'auraient pas la direction indiquée par la loi se détruiraient par leur interférence, et, par suite, que le faisceau réfracté est limité.

Il résulte de l'explication de la réfraction que nous venons d'exposer que $n = v : v'$; ainsi quand n est plus grand que l'unité, v est plus grand que v'; ainsi la vitesse de la lumière est plus grande dans le vide que dans un corps réfringent. Dans le système de l'émission on est conduit à un résultat opposé.

Il est important aussi de remarquer que si λ et λ' représentent les longueurs d'ondulation dans l'air et dans le corps, comme ces longueurs sont les chemins parcourus par la lumière dans le même temps, elles sont en raison directe des vitesses de la lumière dans les deux milieux, et on a

$$\lambda : \lambda' = v : v' = n.$$

1535. Une expérience très-curieuse de MM. Fresnel et Arago vient à l'appui de ce résultat du système des vibrations. Dans l'expérience des deux miroirs que nous avons décrite précédemment, les franges sont toujours placées symétriquement par rapport au plan mené par le milieu de la ligne qui joint les deux images du point lumineux et perpendiculairement à cette direction. Mais il est évident que cette symétrie suppose nécessairement que les deux faisceaux qui interfèrent parcourent le même milieu dans tout le trajet : car, s'il n'en était point ainsi, tout le système des franges serait porté du côté du faisceau qui aurait traversé le corps le plus réfringent, puisque les distances du milieu de la frange centrale aux deux points lumineux doivent renfermer le même nombre de longueurs d'ondulation ; et, ces longueurs étant d'autant plus petites dans les corps qu'ils sont plus réfringents, la distance métrique de la frange centrale au point lumineux dont les rayons ont traversé le corps réfringent devra être plus petite que l'autre. L'expérience a parfaitement confirmé cette conséquence de la théorie : lorsqu'on place une lame mince de mica ou de chaux sulfatée sur le chemin d'un des faisceaux, les franges sont portées de ce côté, et quand les lames ne sont pas très-minces, elles sortent de l'espace éclairé et disparaissent.

Cette expérience est même le moyen le plus exact qu'on connaisse pour déterminer les indices de réfraction. En effet, supposons qu'on ait mesuré très-exactement, à l'aide d'un sphéromètre, l'épaisseur de la lame mince qui a été placée dans le trajet d'un des faisceaux lumineux, et qu'on ait mesuré le déplacement des franges à l'aide du micromètre ; supposons, par exemple, que la bande centrale ait été déplacée de n largeurs de frange, que e représente l'épaisseur de la lame mince, et λ, λ', les longueurs d'ondulation de la lumière dans l'air et dans la lame mince ; il est évident que le nombre des ondulations renfermées dans une lame d'air ayant une épaisseur e, augmenté de n, sera égal au nombre des ondulations comprises dans la lame mince, ainsi on aura

Digitized by Google

$$\frac{e}{\lambda} + n = \frac{e}{\lambda'}, \text{ d'où } \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{v}{v'} = \frac{e + n\lambda}{e}.$$

La détermination des indices de réfraction par le procédé que nous venons d'indiquer est susceptible d'une très-grande précision; mais pour l'appliquer aux corps solides ou liquides il exige que ces corps soient réduits en lames très-minces, pour que le déplacement des franges ne les fasse pas sortir du champ lumineux, ou bien que l'on place dans les deux faisceaux des plaques épaisses produisant des effets peu différents, dont on connaisse les épaisseurs et l'indice de l'une d'elles. Mais elle est surtout avantageuse pour la détermination des indices des corps qui diffèrent peu, et principalement pour ceux des gaz et des vapeurs. C'est par cette méthode que MM. Fresnel et Arago ont déterminé la différence de réfraction de l'air sec et de l'air saturé de vapeurs d'eau à 30°, différence qui est si petite qu'elle échapperait à tout autre moyen d'observation.

1536. Si nous désignons par e, e', d, d', les élasticités et les densités de l'éther dans le vide et dans un milieu réfringent, et par u et u' les vitesses de la lumière dans ces deux milieux, on aura, comme pour la vitesse de propagation du son,

$$u = \sqrt{\frac{e}{d}} \quad \text{et} \quad u' = \sqrt{\frac{e'}{d'}} \quad \text{d'où} \quad n^2 = \frac{ed'}{e'd},$$

et par suite

$$n^2 - 1 = \frac{ed' - e'd}{e'd}.$$

Si on pose $d = em$ et $d' = e'm'$, il vient

$$n^2 - 1 = \frac{m' - m}{m}.$$

Ainsi la puissance réfractive est la différence des rapports de la densité de l'éther à son élasticité dans le corps réfringent et dans le vide relativement à ce rapport dans le vide; et, si on suppose que $d = d'$, $n^2 - 1$ représente l'accroissement d'élasticité de l'éther par rapport à son élasticité dans le second milieu.

1537. *Dispersion.* Nous avons vu en parlant du son que les ondes se propagent toujours dans le même milieu avec la même vitesse, quelle que soit d'ailleurs leur longueur. Mais il n'en est pas de même des ondes lumineuses : les vitesses de propagation sont d'autant plus petites qu'elles sont plus courtes, puisqu'elles sont décroissantes du rouge au violet. Cette différence entre la propagation du son et de la lumière provient de ce que, pour le son, les longueurs d'ondulations sont toujours très-grandes relativement à la distance à laquelle s'étendent les actions des forces développées, tandis que, pour la lumière, les longueurs d'ondulation sont comparables à la limite d'action des forces. On se rendra facilement compte de cette différence, si on remarque que les ondes sonores les plus courtes sont toujours de plusieurs centimètres, tandis que les ondes lumineuses les plus longues ne sont que de $0^{mm}.000620$. En partant du fait que nous venons de supposer, Fresnel a démontré rigoureusement que la vitesse de propagation des ondes dans le même milieu était d'autant plus petite que les ondes sont plus courtes, et, plus récemment, M. Cauchy a démontré que dans un milieu quelconque, quelle que soit d'ailleurs la limite des forces, la vitesse de propagation diminue avec la longueur d'ondulation.

Digitized by Google

On voit d'après cela que, quand un faisceau de lumière blanche pénètre obliquement dans un corps réfringent, chaque faisceau homogène suit une route différente, d'autant plus rapprochée de la normale que sa longueur d'ondulation est plus courte.

Anneaux colorés.

1538. Les anneaux colorés produits par réflexion sur une lame mince résultent de l'interférence des rayons réfléchis à la première et à la seconde surface de la lame; les anneaux vus par transmission résultent de l'interférence des rayons transmis directement, et de ceux qui traversent la lame mince après avoir éprouvé deux réflexions intérieures. Mais, pour démontrer que ces interférences produisent les phénomènes observés, nous avons besoin d'un principe découvert par Yong, et démontré ensuite rigoureusement par M. Poisson. Voici en quoi il consiste : lorsqu'une onde tend à passer d'un milieu dans un autre moins réfringent, une partie de l'onde est réfléchie dans le premier, et l'onde réfléchie est la continuation de l'onde incidente; mais si le second milieu est plus réfringent que le premier, les mouvements dans l'onde réfléchie changent de signe. Ce phénomène est tout à fait analogue à ce qui se produit dans le choc de deux billes : la bille choquante prend des vitesses de signes contraires quand la bille choquée a une masse plus petite ou plus grande que la sienne, et elle reste en repos quand les masses sont égales.

Cela posé, admettons d'abord qu'on observe la lumière réfléchie sous l'incidence perpendiculaire, ou du moins dans une direction qui s'en écarte très-peu; considérons un des systèmes d'ondes envoyés par l'objet éclairant sur la première surface de la lame d'air, c'est-à-dire sur la seconde surface du verre supérieur. Ce que nous dirons de ce système d'ondes pourra s'appliquer à tous les autres. Au moment où il arrive à la surface de séparation du verre et de l'air, il éprouve une réflexion partielle qui diminue un peu l'intensité de la lumière transmise dans la lame d'air, et fait naître en dedans du premier verre un autre système d'ondes, dont l'intensité est, comme on sait, très-inférieure à celle de la lumière transmise; en sorte que celle-ci, étant fort peu affaiblie par cette première réflexion, produit, en arrivant à la seconde surface de la lame d'air, un second système d'ondes réfléchies d'une intensité presque égale à celle des ondes qui proviennent de la première réflexion : voilà pourquoi leur interférence produit des couleurs si vives dans la lumière blanche, et des anneaux brillants et obscurs si prononcés dans une lumière homogène. Les deux surfaces de la lame d'air étant sensiblement parallèles dans le voisinage du point de contact où se forment les anneaux colorés, les deux systèmes d'ondes suivront la même route; mais celui qui a été réfléchi à la seconde surface se trouvera en retard relativement à l'autre, et d'une quantité égale au double de l'épaisseur de la lame d'air qu'il a traversée deux fois. Il faut encore remarquer qu'il existe entre eux une autre différence : c'est que le premier a été réfléchi en dedans du verre ou du milieu le plus dense, tandis que l'autre l'a été en dehors du verre inférieur; d'où il résulte, d'après le principe établi ci-dessus, une opposition dans les mouvements oscillatoires. Ainsi, lorsqu'en raison de la différence des chemins parcourus, les deux systèmes d'ondes devraient être d'accord, c'est-à-dire exécuter tous leurs mouvements oscillatoires dans le même sens, nous en conclurons qu'ils sont au contraire en discordance complète; et réciproquement, lorsque la différence des chemins parcourus indiquera une discordance complète, nous en conclurons que leurs mouvements oscillatoires s'accordent parfaitement. Cela posé, il est aisé de déterminer la position des anneaux obscurs et brillants.

Et d'abord, le point de contact, où l'épaisseur de la lame d'air est nulle, ne pro-

Digitized by Google

duisant aucune différence de marche entre les deux systèmes d'ondes, devrait établir un accord parfait entre leurs vibrations : ainsi, puisqu'en raison de l'opposition de signe, c'est le contre-pied qu'il faut prendre, leurs vibrations seront en discordance complète, et le point de contact, vu par réflexion, présentera une tache noire. A mesure qu'on s'en éloigne, l'épaisseur de la lame d'air augmente. Arrêtons-nous au point où son épaisseur est égale à un quart d'ondulation : la différence des chemins parcourus sera une demi-ondulation, qui répond à une discordance complète, et par conséquent il y aura accord parfait entre les deux systèmes d'ondes ; ce sera donc le point le plus éclairé du premier anneau brillant. Lorsque l'épaisseur de la lame d'air sera la moitié d'une ondulation, la différence des chemins parcourus étant égale à une ondulation qui répond à l'accord parfait, il y aura discordance complète, et ce point sera le milieu d'un anneau obscur. Il est facile de voir en général, par les mêmes raisonnements, que les points les plus noirs des anneaux obscurs répondent aux épaisseurs de la lame d'air, égales à

$$0,\ 2/4\lambda,\ 4/4\lambda,\ 6/4\lambda,\ 8/4\lambda,\ \text{etc.},$$

et les points les plus éclairés des anneaux brillants aux épaisseurs

$$1/4\lambda,\ 3/4\lambda,\ 5/4\lambda,\ 7/4\lambda,\ 9/4\lambda,\ \text{etc.}$$

λ étant la longueur d'ondulation lumineuse dans l'air ; ou, si l'on prend pour unité le quart de cette longueur, les épaisseurs de la lame d'air correspondantes aux maxima et minima de la lumière réfléchie seront représentées par les nombres suivants :

Anneaux obscurs.	0, 2, 4, 6, 8, 10, etc.;
Anneaux brillants.	1, 3, 5, 7, 9, 11, etc.

Cette unité, ou le quart d'une ondulation lumineuse, est précisément la longueur de ce que Newton appelle les accès des molécules lumineuses : ainsi, en multipliant par quatre les mesures qu'il a données pour les sept principales espèces de rayons simples, on obtiendra les longueurs correspondantes de leurs ondulations. On trouve de cette manière les mêmes résultats qu'en déduisant les longueurs d'ondulation de la mesure des franges produites par deux miroirs.

1539. Nous avons vu précédemment, en parlant de la réfraction, que la vitesse de la lumière, en passant d'un milieu dans un autre, varie dans le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction ; mais les longueurs d'ondulation varient dans le même rapport que ces vitesses : par conséquent, lorsque l'on remplacera la lame d'air renfermée entre les deux verres par un liquide quelconque, les épaisseurs correspondantes aux mêmes anneaux varieront dans le rapport du sinus d'incidence au sinus de réfraction pour le passage de la lumière de l'air dans le liquide. C'est précisément la loi de Newton.

1540. Quand les rayons incidents sont inclinés à la normale, on retombe encore exactement sur la formule que Newton avait déduite de l'observation.

On voit facilement, à l'inspection de la figure 922, qu'en désignant par t la différence des chemins parcourus par les rayons réfléchis à la première et à la deuxième surface, par e l'épaisseur de la lame d'air, et par i l'angle d'incidence, on a

$$t = 2cd - gf,\quad cd = \frac{e}{\cos i},\quad gf = ge \sin i = bd \sin i = 2bo \sin i = 2e \tang i \sin i,$$

Digitized by Google

d'où $$\delta = 2e\left(\frac{1}{\cos i} - \frac{\sin^2 i}{\cos i}\right) = 2e\cos i.$$

Ainsi, en désignant par e et e' les épaisseurs de la lame d'air qui réfléchissent le même anneau sous l'incidence perpendiculaire et sous l'incidence i, on aura

$$2e = 2e'\cos i \quad \text{ou} \quad e' = \frac{e}{\cos i}.$$

Si la lame mince était formée d'une substance quelconque ayant n pour indice, on aurait

$$\delta = 2e\left(\frac{n - \sin^2 i}{n\cos i}\right),$$

i étant toujours l'incidence à la seconde surface de la lame mince.

La formule à laquelle nous venons d'être conduits est celle de Newton pour des inclinaisons qui ne dépassent pas une certaine limite; au delà elle cesse d'être exacte : cette anomalie tient probablement à ce que les lois ordinaires de la réfraction d'après lesquelles la formule a été calculée éprouvent quelques modifications dans le passage très-oblique des rayons entre deux surfaces aussi rapprochées.

Dans ce qui précède nous avons supposé que les anneaux colorés résultaient seulement de l'interférence des rayons réfléchis à la première surface de la lame avec les rayons réfléchis une seule fois à la seconde surface. Cependant il y a des rayons qui sortent après 2, 3, 4, etc., réflexions à la seconde surface. Mais il faut remarquer que quand la lame mince a une courbure prononcée, ces reflexions multiples font varier rapidement la direction des rayons emergents, qui alors n'exercent qu'une action très-faible sur le rayon réfléchi à la première surface, et peuvent par conséquent être négligés; mais quand la courbure de la lame est extrêmement petite ou nulle, il faut nécessairement y avoir égard, et c'est une chose très-facile. Supposons d'abord que le double de l'épaisseur de la lame mince soit égal à un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation, il est évident que les rayons réfléchis à la seconde surface seront tous en retard les uns sur les autres d'un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation, qu'ils seront tous d'accord, et qu'ils interféreront tous de la même manière avec les rayons réfléchis à la première surface, et par conséquent que l'intensité de la lumière réfléchie dépendra uniquement de la différence de l'intensité de ce dernier rayon et de la somme des intensités des rayons réfléchis. Si au contraire le double de l'épaisseur de la lame mince était égal à un nombre impair de $\frac{\lambda}{2}$ les rayons qui auront éprouvé un nombre impair de réflexions seront en discordance, et ceux qui en auront éprouvé un nombre pair seront d'accord : alors, comme la somme des intensités des premiers l'emporte sur celle des derniers, l'effet résultant sera toujours dans le même sens que celui qui résulte de l'interférence du rayon qui n'a éprouvé qu'une seule réflexion.

1541. On explique très-bien d'après ces principes pourquoi le centre des anneaux réfléchis produits sous l'incidence perpendiculaire est parfaitement noir quand les deux lentilles sont en contact. En effet, dans ce cas, en regardant l'épaisseur de la lame comme infiniment petite même relativement à la longueur d'ondulation, les rayons qui sortent après un nombre quelconque de réflexions sur la seconde surface de la lame mince sont tous d'accord, et la tache centrale sera parfaitement noire, si la somme des vitesses d'ondulation des rayons réfléchis à la seconde surface est

Digitized by Google

égale à la vitesse d'ondulation du rayon réfléchi à la première surface ; or, le calcul établit la plus parfaite égalité entre les vitesses de ces deux faisceaux.

Nous avons vu (147) que, si une masse élastique m, animée d'une vitesse v, vient choquer une masse m' également élastique, mais en repos, après le choc la vitesse de la première est $\frac{m-m'}{m+m'}v$ (*a*), et celle de la seconde est $\frac{2m}{m+m'}v$ (*b*).

En assimilant ces phénomènes à ceux qui se passent entre les lames infiniment minces des éthers des deux corps en contact, on voit que, v représentant l'amplitude des vibrations de la lumière incidente, m et m' les densités de l'éther dans le premier et le second milieu, l'amplitude des vibrations du rayon réfléchi par la première surface sera représentée par la formule (*a*), et la vitesse de vibration du rayon transmis par la formule (*b*). Cela admis, posons pour plus de smplicité

$$\frac{m-m'}{m+m'}=r, \quad \frac{2}{m+m'}=e,$$

et représentons la vitesse de vibration du rayon incident par l'unité.

Lorsque le rayon passera de l'air dans le verre, on obtiendra évidemment les vitesses des rayons réfléchis et transmis en changeant m en m' et m' en m : par ce changement la vitesse du rayon réfléchi reste la même, au signe près ; mais celle du rayon transmis, qui était me dans le premier cas, devient $m'e$ dans le second.

Suivons maintenant la marche du rayon transmis em. Ce rayon, arrivé à la seconde surface de la lame, donne un rayon réfléchi dont la vitesse est $-emr$; de retour à la première surface, le rayon qui en sort a une vitesse $-emrem' = (-mm'e^2r)$, et le rayon réfléchi a une vitesse emr^2 ; ce rayon réfléchi, à la seconde surface, devient $-emr^3$, qui produit un nouveau rayon émergent $-emr^3 \times m'e = (-mm'e^2r^3)$, et un rayon réfléchi emr^4 ; ce dernier, après une nouvelle réflexion, qui réduit sa vitesse à $-emr^5$, produit un nouveau faisceau émergent $-emr^5 \times m'e = (-mm'e^2r^5)$, et ainsi de suite : alors la somme des vitesses des rayons réfléchis à la seconde surface est

$$-mm'e^2r\,(1+r^2+r^4+\text{etc....}).$$

La progression ayant r^2 pour raison renfermant un nombre infini de termes, et r étant une fraction plus petite que l'unité, on trouve que la somme de cette progression est $1:(1-r^2)$. Alors, en substituant pour e et r leurs valeurs, on trouve $-\frac{m-m'}{m+m'}$ pour résultat final, c'est-à-dire exactement la vitesse du rayon réfléchi à la première surface, mais avec un signe contraire.

1542. Quant aux anneaux qu'on observe par transmission, ils résultent, comme nous l'avons déjà dit, de l'interférence des rayons transmis directement avec ceux qui ne l'ont été qu'après avoir éprouvé deux réflexions consécutives dans la lame mince. En effet, les différences de marche des rayons qui interfèrent après la transmission sont alors exactement les mêmes que celles des rayons qui interfèrent après la réflexion ; mais comme, dans le premier cas, la double réflexion fait disparaître le changement de signe de la vitesse du rayon réfléchi, il s'ensuit que les effets produits par l'interférence dépendent uniquement de la différence des chemins, et par conséquent que les deux ordres d'anneaux sont complémentaires. La teinte si faible des anneaux transmis résulte de la faible intensité des rayons qui sortent après deux réflexions successives.

1543. Le système des ondulations explique avec une extrême facilité les anneaux réfléchis à centres blancs dont nous avons parlé (1379), et qui se forment quand la

Digitized by Google

lame mince est placée entre deux milieux qui sont l'un plus, l'autre moins réfringent. En effet, dans ce cas, les réflexions à la première et à la seconde surface de la lame mince ayant lieu dans les mêmes circonstances, c'est-à-dire quand la lumière rencontre un milieu qui est plus réfringent ou moins réfringent, il n'y a plus lieu d'ajouter une demi-longueur d'ondulation à la différence des chemins parcourus par les ondes qui interfèrent, et par conséquent les anneaux doivent être complémentaires de ce qu'ils sont dans les cas ordinaires, et par suite le centre doit être coloré dans une lumière homogène, et blanc dans la lumière blanche.

1544. *Anneaux colorés produits par des plaques épaisses.* Les anneaux dont il est question, et dont nous avons décrit toutes les particularités (1380), s'expliquent aussi très-facilement dans le système des ondulations. En effet, lorsqu'un faisceau très-fin de lumière homogène vient rencontrer perpendiculairement la première surface d'une glace étamée, le rayon qui pénètre normalement dans le verre, à cause de l'imperfection du poli de la surface, est environné d'un faisceau de rayons d'une faible intensité, et d'autant plus petite qu'ils s'éloignent davantage de la normale. Ces rayons disséminés, réfléchis à la seconde surface, émergent par la première dans un cône plus ouvert; le rayon principal de retour à la première surface produit encore de nouveaux rayons disséminés autour de lui, et c'est l'interférence de ces derniers avec les premiers qui donne naissance aux franges qu'on observe. Il est facile de voir que les rayons de ces deux systèmes ont parcouru sensiblement le même chemin, et que la différence, très-petite, augmente avec la distance de leurs points de concours à l'axe du faisceau. M. W. Herschell a retrouvé par le calcul toutes les circonstances que présentent ces phénomènes.

1545. M. Brewster a produit des bandes colorées avec des plaques épaisses par une disposition que nous rapporterons. Supposons que A et B (*fig.* 923) représentent deux plaques de la même substance à faces parallèles et d'égale épaisseur, si, les plaques étant légèrement inclinées, on regarde un objet lumineux à travers, par exemple la flamme d'une bougie, on voit, outre l'image directe, une image plus faible déviée du côté de l'angle du prisme d'air, et cette image est couverte de bandes irisées d'autant plus larges que l'angle des deux plaques est plus petit. Avec une lumière homogène, l'image latérale est traversée par des bandes noires. Si l'appareil des deux glaces est fixé à l'extrémité d'un tube noirci de 20 à 30 centimètres de longueur terminé à l'autre extrémité par un orifice, en regardant le ciel on aperçoit sur l'image latérale de très-belles franges. L'image latérale provient des rayons qui émergent après avoir éprouvé deux réflexions, et les franges proviennent de l'interférence de ceux de ces rayons qui, ayant traversé le même nombre de fois les lames de verre et le prisme d'air, diffèrent cependant de marche, suivant le point où ils ont traversé le système pour arriver à l'œil de l'observateur. En désignant par t l'épaisseur commune des lames A et B, par i l'épaisseur de la lame d'air, il est facile de voir que les rayons désignés par 1, 2, 3, 4, ont traversé des épaisseurs $2t + 3i$, $4t + 3i$, $4t + 3i$, et $6t + 3i$; ainsi, le 2e et le 3e sont les seuls qui pourront interférer et produire des franges, les différences de marche des autres étant trop considérables.

On obtient aussi des franges analogues et qui ont la même origine, au moyen d'un petit appareil formé de deux douilles qui s'emboitent, et dont chacune porte une plaque à face parallèle fixée sur son fond sous le même angle; en tournant une des douilles, on peut placer les glaces parallèlement ou leur donner une inclinaison quelconque.

Digitized by Google

Diffraction.

1546. Le docteur Yong avait expliqué les phénomènes de diffraction par l'interférence des rayons directs avec les rayons réfléchis contre les bords des corps ou des orifices. Cette explication satisfait à certains phénomènes; mais il en est pour lesquels les résultats de la théorie sont en contradiction manifeste avec l'observation. D'ailleurs, dans cette théorie, l'épaisseur, la nature et le degré de poli des corps devraient avoir une grande influence, tandis que l'expérience démontre qu'elle est nulle.

1547. L'explication de la diffraction repose sur le principe des interférences, que nous avons développé avec beaucoup de détails, et sur le principe d'Huyghens qu'on peut énoncer ainsi : le mouvement en un point quelconque d'une onde peut être considéré comme la résultante des petits mouvements élémentaires qu'y enverraient en même temps tous les points de l'onde considérée dans une quelconque de ses positions antérieures; car chaque point d'une onde est un centre d'ébranlement qui tend à propager le mouvement dans tous les sens; et, en vertu du principe de mécanique connu sous le nom de *principe de la superposition des petits mouvements*, quand des ondes partent de différents centres d'ébranlement, le mouvement imprimé à une molécule du fluide est égal à la résultante des petits mouvements qui sont produits sur cette molécule par chacun des centres d'ébranlement considéré séparément. Le mouvement en retour est détruit par la nature même du mode de communication (397), et les mouvements latéraux se détruisent mutuellement, mais seulement quand l'onde n'est point interceptée.

Mais, comme chaque point de l'onde est ébranlé dans une direction déterminée, le mouvement propagé dans cette direction aura plus d'intensité que dans toute autre, et cette intensité ira en décroissant à mesure que les directions de propagation s'éloigneront davantage de la normale à la surface de l'onde, suivant une loi inconnue, mais que Fresnel suppose très-rapide, du moins pour la lumière. Voici maintenant la méthode que Fresnel a employée pour calculer dans tous les cas les effets produits par la diffraction. Dans tous, les ondes sont partiellement interceptées. Lorsque les franges sont produites par un corps indéfini dans un sens, il n'y a qu'une moitié de chaque onde qui dépasse l'écran; lorsque les franges sont formées dans l'ombre d'un corps étroit, les ondes sont seulement diminuées de l'épaisseur du corps; et enfin, quand les franges sont formées par une ou plusieurs fentes, les ondes ont seulement la largeur des fentes. Alors Fresnel a calculé les effets produits à une distance donnée par tous les points libres des ondes, et les résultats du calcul se sont toujours trouvés parfaitement d'accord avec l'expérience.

Nous n'entrerons pas dans tous les détails des calculs par lesquels Fresnel a déterminé les effets produits par la diffraction; nous nous contenterons d'expliquer les apparences observées par de simples considérations géométriques; nous supposerons que le corps lumineux est réduit à une fente étroite, et alors les ondes seront cylindriques; nous supposerons en outre que la lumière est homogène.

1548. *Franges produites par un écran indéfini.* Soient MN (*fig.* 924) un écran plan indéfini parallèle à la ligne lumineuse qui se projette en C, MD la base de l'onde lumineuse cylindrique qui rencontre le bord de l'écran; cherchons la quantité de lumière qui parviendra en un point P quelconque situé à une grande distance par rapport à la longueur d'ondulation; menons la ligne PC et divisons l'arc DM, à partir du point A, en parties inégales Am, mm', $n'm''$, An, $n'n'$, nn'', etc., de manière que la différence des distances des points de division consécutifs au point P soit égale à la moitié d'une longueur d'ondulation, et imaginons que ces parties de l'arc MD

Digitized by Google

soient elles-mêmes divisées en un même nombre très-grand d'éléments. Cela posé, représentons par 2 l'intensité de la lumière qui éclairerait le point P si l'écran n'existait pas; il est évident que dans une position quelconque du point P la quantité de lumière qui y arrivera sera composée de celle qui est envoyée par la demi-onde AD, qui est égale à 1, et de celle qui sera envoyée par l'arc AM. Si ce dernier arc renferme une seule division, il est évident que les mouvements de ses différents éléments seront d'accord avec ceux des éléments correspondants de la première division de l'autre côté du point A, et les effets s'ajouteront; mais si l'arc AM renferme deux divisions; les effets produits par les éléments correspondants se détruiront sensiblement, et la lumière supportée au point P par l'onde totale MD sera plus petite que dans le premier cas; en continuant à supposer l'arc AM toujours plus grand d'une division, il est facile de voir qu'il y aura accroissement de lumière quand l'arc AM renfermera un nombre impair de divisions. Ainsi, en plaçant un écran à une certaine distance, on devra y voir des lignes alternativement brillantes et obscures.

Il est même facile de déduire de là les trajectoires suivant lesquels les franges se propagent : car, par exemple, pour les franges obscures du premier ordre, la différence des distances du point P aux points A et M étant égale à deux demi-longueurs d'ondulation, la différence des distances du même point P aux points C et M sera plus grande de CA, et comme cette dernière longueur est constante, on voit que la frange se propagera suivant un cylindre hyperbolique dont la base est une hyperbole ayant ses foyers aux points C et M.

En désignant CM par a, par d la différence des distances du point P aux points M et A, par x la distance du point P au point o milieu de CM comptée sur CL, par y la distance de ce point au bord de l'ombre géométrique, et enfin par A et B les deux axes de l'hyperbole, on aura, en négligeant d^2,

$$2A = a - d, \quad A^2 = \frac{a^2 - 2ad}{4} = \frac{a(a-2d)}{4};$$

$$B^2 = \frac{a^2}{4} - \frac{a(a-2d)}{4} = \frac{ad}{2};$$

et, en substituant ces valeurs de A et de B dans l'équation de l'hyperbole,

$$2a(a-2d)y^2 - 4adx^2 = -a(a-2d)ad.$$

Mais, comme cette courbe est rapportée à son centre situé au milieu de CM, si on veut transporter les axes au point M, il faudra faire

$$x = x' + \tfrac{1}{2}a;$$

et l'équation, ainsi transformée et résolue par rapport à x, donne, en négligeant les termes qui contiennent d^2 et d, par rapport à a,

$$y = 2\sqrt{\frac{dx'(x'+a)}{2a}}.$$

Pour obtenir les distances des centres des franges obscures successives au bord de l'ombre géométrique, il suffira de remplacer, dans la valeur de y, d successivement par λ, 2λ, 3λ, etc. On voit facilement d'après cela que les franges ne sont point à égale

Digitized by Google

distance, et qu'elles se rapprochent les unes des autres d'autant plus qu'elles s'éloignent davantage des bords de l'ombre géométrique.

Les maxima et les minima d'intensité des franges iront en diminuant à mesure qu'ils s'éloigneront de l'ombre géométrique, car les divisions efficaces qui sont toujours voisines du point M ont des longueurs d'autant plus petites, et rayonnent d'autant plus obliquement, que le point P s'éloigne davantage.

La lumière qui se propage dans l'intérieur de l'ombre géométrique ne présentera ni maxima ni minima d'intensité, mais elle décroîtra rapidement et d'une manière continue. En effet, chaque point K de l'ombre reçoit de la lumière d'une demi-onde MD, et si, pour chaque point, on divise cette demi-onde, à partir du point M, en arcs tels, que la différence de distance des points de division au point K soit égale à une demi-longueur d'ondulation, la quantité de lumière qu'enverrait séparément au point K une des divisions diminuerait à mesure qu'elle serait plus éloignée du point A, à cause de l'accroissement d'obliquité et de la diminution de longueur; par conséquent, la lumière de chacune d'elles pourra être considérée comme composée de deux parties, l'une détruite par une partie de la division précédente, l'autre par une partie de la division suivante : alors le point M sera éclairé par une partie seulement de la première division ; ainsi l'intensité de la lumière décroîtra rapidement et d'une manière continue à mesure que le point K s'éloignera du point L.

1549. D'après la manière dont Fresnel a envisagé la diffraction, on n'a point égard au plus ou moins d'épaisseur des bords de l'écran, mais seulement à la partie de l'onde qui peut envoyer des rayons élémentaires aux points dont on calcule l'intensité; et le corps opaque ne remplit d'autres fonctions que de supprimer une partie de l'onde : voilà pourquoi le résultat du calcul est indépendant de la nature de ce corps, de sa masse et de l'épaisseur de ses bords. Cependant si leur surface était trop grande, on ne pourrait plus considérer l'onde primitive au moment où elle les quitte comme n'ayant reçu aucune modification sensible, et il faudrait tenir compte dans le calcul des petites franges qu'aurait déjà fait naître son passage contre les parties antérieures. Mais tant qu'ils ont peu d'épaisseur, ou une courbure prononcée, les petites franges aussi produites sont si étroites qu'on peut les négliger et regarder l'onde émergente comme ayant une intensité uniforme dans toute son étendue au moment où elle quitte l'écran, surtout si on calcule les intensités de la lumière à une distance un peu grande de ce corps.

1550. Il est important de remarquer que le décroissement rapide de la lumière dans l'ombre géométrique résulte du décroissement rapide de la lumière dans des directions qui s'écartent de plus en plus de la normale à la surface de l'onde et de la petitesse des longueurs d'ondulation. S'il n'en était pas ainsi, la lumière se propagerait dans l'ombre à une distance d'autant plus grande que la loi de décroissement serait moins rapide et les longueurs d'ondulation plus grandes; et, si tous les points de l'onde tendaient à propager également la lumière dans tous les sens, il est évident que l'ombre géométrique serait fortement éclairée. C'est là, sans aucun doute, la raison pour laquelle le son se propage avec une faible diminution d'intensité derrière les obstacles placés perpendiculairement à la direction de la transmission, et pourquoi les ondes formées à la surface de l'eau se reforment complètement derrière un obstacle. Les lois des variations d'intensité du mouvement dans des directions obliques ou normales des ondes ne sont point connues.

1551. *Franges formées par une ouverture très-étroite.* Lorsque l'écran est seulement percé d'une fente longitudinale très-étroite, d'une longueur indéfinie, il faut chercher pour les différents points éclairés par le faisceau lumineux la résultante de toutes les ondes élémentaires qui émanent de la partie de l'onde primitive

Digitized by Google

comprise dans la largeur de cette ouverture; mais nous pouvons, par des considérations géométriques très-simples, déterminer la disposition de ces franges.

Il peut se former ou des franges dans l'ombre ou des franges dans la partie éclairée, ou en même temps des franges extérieures et intérieures; nous allons essayer de faire comprendre la formation de ces différentes espèces de franges. Soient (*fig.* 925) C le point lumineux, AB l'orifice, EF la projection conique de l'orifice sur l'écran XY. Occupons-nous d'abord des franges intérieures; supposons que l'écran XY ait été placé de manière que les différences de distance du point P aux points A et M et aux points B et M soient exactement d'une demi-ondulation : alors toutes les ondes élémentaires parties des différents points de AMB apporteront au point P des mouvements de même signe, et concourront à en augmenter l'éclat. La même chose aura évidemment lieu si on suppose que l'écran s'éloigne de l'ouverture, puisque les différences des distances des points P', P'', aux points A et M et B et M, deviennent plus petites qu'une demi-ondulation. Prenons maintenant dans la projection de l'ouverture sur l'écran XY un point O qui soit tel que $OB - OA$ soit égal à une ondulation entière; en prenant un point N qui divise l'arc AB en deux parties telles que l'on ait

$$OB - ON = ON - OA = 1/2\,\lambda,$$

il est évident que les deux arcs AN et NB enverront au point O des mouvements de signes contraires, et que le point O sera le centre d'une bande obscure. De même, si on prenait un point L, pour lequel on aurait

$$LB - LA = 3/2\,\lambda,$$

on pourrait diviser l'arc AB en trois parties, telles que les différences des distances des points de division au point L fussent d'une demi-ondulation : alors le point L serait le centre d'une bande brillante. Ainsi il y aura de chaque côté du point P des bandes sombres et brillantes symétriquement placées par rapport à l'axe CP. Il est facile de voir que ces bandes se rapprocheront des bords de l'ombre à mesure que l'écran s'éloignera, et qu'elles disparaîtront complétement lorsque l'écran aura une position $X''Y''$, telle que, $QB - QA = 1/2\,\lambda$. Mais si nous rapprochons l'écran XY de l'orifice, le point P sera alternativement le centre d'une bande brillante et d'une bande obscure. En effet, l'écran étant plus rapproché, la différence des distances $PB - PM$ sera toujours $>$ que $1/2\,\lambda$; quand cette différence sera égale à un nombre pair de demi-ondulations, les mouvements provenant des arcs AM et MB se détruiront séparément : car, si $2\,\frac{n\lambda}{2}$ représente la différence en question, on pourra diviser l'arc MB et l'arc MA chacun en $2\,n$ parties, dont les différences de distance au point P soient de $1/2\,\lambda$: alors toutes les ondes élémentaires parties des différents points de deux arcs consécutifs se détruiront sensiblement. Mais si la différence des distances PB et PM était d'un nombre impair de demi-ondulations, on pourrait diviser l'arc MB en un nombre impair d'arcs, dont les effets se détruiraient sensiblement, à l'exception d'un seul.

Il est facile de voir, d'après ce qui précède, que, si on prend dans l'ombre géométrique des points o, o', o'', qui soient tels que les différences des distances de chacun de ces points aux points A et B soient égales à un nombre pair de demi-ondulations, ces points seront les centres de bandes obscures; et que, si on prend une série de points l, l', l'', etc., pour lesquels les différences des distances aux points A et B soient d'un nombre impair de demi-ondulations, ces points seront des centres de

Digitized by Google

bandes brillantes. Si maintenant nous remarquons que les conditions qui déterminent la formation des franges intérieures et extérieures sont les mêmes, et que pour les franges d'un même ordre, formées sur un écran dont la distance varie, les différences des distances aux points A et B sont constantes; il en résulte que les franges se propagent suivant des hyperboles dont les points A et B sont les foyers. La distance AB étant toujours extrêmement petite, on peut considérer ces courbes comme se confondant avec leurs asymptotes.

Pour obtenir les équations des lignes suivant lesquelles les franges se propagent sensiblement, représentons par A et B les axes de l'hyperbole, par d la différence de longueur des rayons vecteurs, et par c la largeur de la fente, nous aurons

$$2A = d \quad \text{et} \quad A^2 + B^2 = \frac{c^2}{4}; \quad \text{d'où} \quad A = \frac{d}{2}, \quad \text{et en négligeant} \ \frac{d^2}{4} \ B = \frac{c}{2}:$$

l'équation de l'asymptote, en prenant l'axe imaginaire pour l'axe des x, est alors

$$y = \frac{A}{B} x = \frac{d}{c} x.$$

Pour les franges obscures, il faudra remplacer d par un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation, et pour les franges brillantes par un nombre impair : il est alors facile de voir que les franges sont également distantes, et que leur largeur est proportionnelle à la distance du micromètre à la fente, à la longueur d'ondulation, et en raison inverse de la largeur de l'orifice.

L'expérience confirme parfaitement ces résultats théoriques, dans les circonstances où l'approximation que nous avons employée est permise.

Le docteur Yong avait expliqué les phénomènes dont il s'agit par l'interférence des rayons réfléchis sur les bords de l'orifice; mais il est facile de voir que les résultats de l'expérience sont en opposition complète avec ceux qui résulteraient de cette explication, car les franges brillantes devraient occuper la place des franges obscures, et réciproquement.

1552. *Franges produites par deux ouvertures.* Lorsque l'écran est percé de deux fentes très-fines, au travers desquelles passent les rayons émanés d'une ligne lumineuse placée au delà de cet écran, parallèlement aux fentes et à égale distance de chacune d'elles, les franges qui se forment doivent évidemment être disposées de la même manière que celles qui sont produites par un même rayon réfléchi sur deux miroirs légèrement inclinés l'un sur l'autre. En effet, les chemins parcourus jusqu'aux fentes étant égaux, il suffira de compter les chemins parcourus par les rayons à partir des fentes pour avoir leur différence de marche. Ainsi, tout ce que nous avons dit pour le cas de deux miroirs pourra s'appliquer ici, du moins tant que chaque fente sera assez étroite pour être considérée comme un seul centre d'ondulation, relativement aux rayons infléchis qu'elle envoie.

En désignant par c la distance des deux fentes, et conservant la notation de l'article précédent, on est conduit à la même formule approximative, $y = xd : c$; mais, d est égal à un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation pour les franges brillantes, et à un nombre impair pour les franges obscures.

1553. *Franges produites par un corps très-étroit.* Lorsque l'écran, au lieu de s'étendre indéfiniment d'un côté, est assez étroit pour que la lumière infléchie

Digitized by Google

jusqu'au milieu de son ombre ne soit pas trop affaiblie par le décroissement rapide d'intensité que produit l'obliquité des rayons, il faut tenir compte à la fois dans le calcul de ceux qui viennent des deux côtés, et chercher pour chaque point de l'ombre la résultante générale de toutes les ondes élémentaires qu'y envoient les divers points des deux parties de l'onde primitive situées à droite et à gauche de l'écran. On trouve de cette manière que l'intérieur de l'ombre doit être divisé par une série de bandes obscures et brillantes, de largeur à peu près égale, et dont les positions diffèrent très-peu de celles qu'on déduirait en considérant les extrémités du corps comme des centres de rayonnement. Mais quand le corps opaque est très-étroit, et le micromètre assez éloigné de ce corps pour que les bandes observées soient très-voisines des bandes extérieures, alors les calculs faits par la méthode que nous avons exposée précédemment indiquent, comme l'expérience, que cette méthode n'est plus exacte. Les résultats du calcul représentent aussi avec une fidélité remarquable les altérations singulières qu'éprouvent souvent dans ce cas les franges extérieures, lorsque les autres sortent de l'ombre; et viennent en quelque sorte se mêler avec elles.

Lorsque les franges que l'on considère sont éloignées des bords de l'ombre géométrique, on peut trouver leurs positions par des considérations très-simples. Soit AG (*fig.* 926) un corps opaque, assez étroit pour qu'on puisse distinguer des franges dans l'intérieur de son ombre à la distance AB; soient C le point éclairant, BD le carton blanc sur lequel on reçoit les franges; concevons la partie AM de l'onde primitive divisée en petits arcs Am, mm', $m'm''$, etc., de façon que les lignes menées du point P, situé dans l'intérieur de l'ombre, à deux points de division consécutifs, diffèrent d'une demi-ondulation : toutes les petites ondes envoyées en P par les éléments de chacun de ces arcs seront en discordance complète avec les ondes élémentaires qui émanent des parties correspondantes des deux arcs entre lesquels il est compris; mais les arcs enverront au point P des quantités de lumière qui décroîtront rapidement, à mesure qu'ils s'éloignent du point A. Alors on pourra considérer la lumière de chacun d'eux comme composée de deux parties; l'une serait détruite par une partie de la lumière de la division précédente, l'autre par une partie de la lumière de la division suivante : ainsi il ne restera qu'une partie de la lumière émise par l'arc mA, et l'onde résultante répondra à peu près au milieu s de mA. La même chose ayant lieu relativement à l'autre partie GN de l'onde incidente, le degré d'accord ou de discordance entre les vibrations lumineuses qui se manifestent au point P se trouve déterminé par la différence de longueur entre les deux rayons sP et tP qui émanent des milieux des arcs Am et Gn, ou, ce qui revient au même, par la différence entre les rayons AP et GP partis des bords mêmes du corps opaque. Ainsi, lorsque les franges intérieures que l'on considère sont suffisamment éloignées des bords de l'ombre géométrique, on peut, sans erreur sensible, les considérer comme résultant des interférences des ondes qui ont leur centre sur les bords mêmes du corps opaque. Mais, à mesure que le point P se rapproche de B, l'arc Am devient plus grand par rapport à l'arc mm', l'arc mm' devient plus grand par rapport à l'arc $m'm''$, etc.; et de même, dans l'arc mA, les éléments qui avoisinent le point A deviennent sensiblement plus grands que ceux situés vers le point m, et répondent à des différences égales de chemins parcourus. Il en résulte que le rayon efficace sP ne doit plus être la moyenne entre les rayons extrêmes mP et AP, mais se rapprocher davantage de la longueur de celui-ci. De l'autre côté du corps opaque, au contraire, la différence entre les rayons GP et le rayon efficace tP approche d'autant plus d'être exactement égale à un quart d'ondulation que le point P s'éloigne davantage de D. Ainsi la différence des chemins parcourus varie plus rapidement entre les rayons efficaces sP et tP qu'entre les rayons AP et GP : par conséquent, les franges qui avoi-

Digitized by Google

sinent le point B doivent être un peu moins éloignées du centre de l'ombre que ne l'indique la construction fondée sur la première hypothèse.

1554. *Franges produites par une ouverture circulaire ou un écran de même forme.* Dans le cas dont il s'agit, il faut déterminer l'influence des ondes élémentaires qui partent de tous les points de l'orifice ou de tous les points du contour de l'écran. Fresnel a retrouvé par ses calculs toutes les circonstances observées, et que nous avons décrites précédemment (1390).

Dans ce qui précède, nous avons supposé la lumière homogène; il est facile d'en déduire ce qui arriverait dans la lumière blanche, ainsi que les phénomènes analogues produits par la réflexion (1392).

1555. *Franges produites par les réseaux.* Les phénomènes que présentent les réseaux, que nous avons décrits précédemment avec beaucoup de détails (1393), s'expliquent avec une extrême facilité dans le système des ondulations, comme M. Babinet l'a reconnu le premier. Soient MN (*fig.* 927) un réseau éclairé par une fente lumineuse S parallèle aux raies du réseau, C la position de l'œil de l'observateur; nous supposerons que CS soit un plan perpendiculaire au réseau, qui passe par le milieu d'une raie obscure du réseau, et que le foyer de lumière soit assez éloigné pour que le plan du réseau se confonde avec une onde cylindrique. Divisons le réseau, à partir du point A, en parties telles que la différence des distances de deux divisions consécutives au point C soit égale à une demi-longueur d'ondulation, il est évident, d'après ce qui précède, que, si le réseau n'existait pas, les effets produits par deux divisions consécutives se détruiraient sensiblement, et que l'œil ne recevrait que la moitié de la lumière émanée de la première division. Si maintenant nous considérons le réseau, il existera un intervalle transparent et obscur dont l'étendue coïncidera sensiblement avec deux divisions successives; alors ces deux divisions, qui, dans l'absence du réseau, produisaient des ondes qui se détruisaient par leur interférence, enverront de la lumière au point C. Il en sera évidemment de même quand l'intervalle d'une raie obscure et d'une raie brillante occupera 2 divisions, 4 divisions, et ainsi de suite : par conséquent on devra apercevoir des franges brillantes successives, et leur position ne dependra en aucune manière de la largeur relative des raies obscures et transparentes, mais seulement de la somme de ces largeurs; ce qui est parfaitement d'accord avec l'observation de Fraunhofer.

Toutes les autres lois observées par Fraunhofer résultent également de cette explication. En effet, joignons les extrémités d et f de l'élément du réseau correspondant à la première raie avec le point C, où se trouve placé l'œil de l'observateur, et du point d abaissons sur Cf la perpendiculaire dp : les triangles dfp et ACf seront semblables, et nous aurons $df : fp :: Cf : Af$, ou $s : \lambda :: Cf : Af :: 1 : \sin d$. Ainsi $\sin d = \lambda : s$, et pour la frange du n^e ordre, $\sin D$, ou $D = n\lambda : s$, qui est exactement la formule déduite de l'expérience. Il résulte aussi de là que la frange qui provient de l'élément du réseau pour lequel la différence des chemins est égale à deux ondulations devrait disparaître, si la raie obscure avait une largeur égale à celle de la raie transparente; il en serait de même pour la troisième frange, si la largeur d'une des raies était 1/3 de l'espace occupé par les deux raies; et enfin pour la frange de l'ordre n, si la largeur d'une des deux raies était égale à $1/n$ de la somme des largeurs des deux raies; ce qui est encore parfaitement d'accord avec l'expérience. Nous devons dire cependant que, pour que l'explication précédente fût complète, il serait indispensable de faire le calcul des effets produits par tous les rayons qui traversent le réseau, car, dans ce que nous avons dit précédemment, on ne voit pas nettement pourquoi les éléments du réseau qui sont compris entre ceux que nous avons considérés n'envoient pas de lumière. La déviation d pouvant se mesurer avec

Digitized by Google

une très-grande précision (1395), on en déduirait facilement les valeurs de λ pour les différentes couleurs.

En terminant la diffraction, nous répondrons à une objection qu'on a souvent reproduite contre le système des ondulations. Nous avons dit que, si on recevait les franges sur un verre dépoli, elles avaient les mêmes apparences que si on les regardait directement ou avec une loupe. Or, on a prétendu qu'il ne pouvait pas en être ainsi, attendu que les rayons, en se propageant directement dans l'œil, suivent des chemins et éprouvent des différences de marche qui dépendent de leurs directions primitives et des milieux qu'ils traversent. Pour répondre à cette objection, remarquons d'abord que, quand des rayons lumineux qui se propagent suivant des lignes courbes quelconques viennent rencontrer la première surface d'une lentille, les rayons convergent au même point que si les rayons incidents étaient rectilignes et dirigés suivant la dernière tangente à leur trajectoire au point d'incidence. Cela posé, considérons une lentille placée dans un faisceau de franges, se propageant suivant des directions quelconques, l'intersection de la première surface de la lentille et du faisceau renfermera des bandes dans lesquelles l'éther sera alternativement en vibration et en repos, et dans les premières l'intensité et la direction du mouvement en chaque point seront déterminées par la direction et l'intensité de la résultante des petits mouvements émanés des différents centres d'ébranlements. Alors ces mouvements se propageront à travers la lentille et produiront à une certaine distance derrière, sur un écran, une image semblable à celle qu'on verrait sur la première surface de la lentille, si elle était dépolie; mais elle sera renversée; et à ce foyer il ne se produira pas de franges par des interférences directes, parce que, quelque grands que soient les rayons de courbure de la lentille, les différences de distances en ondulations d'un point du plan focal aux points lumineux seraient trop grandes. Ainsi, quand on regarde directement des franges à l'œil nu, celles qu'on voit ne sont pas celles qui se forment directement sur la rétine, mais celles qui se produisent sur la cornée transparente et qui vont former ensuite leur image sur la rétine par réfraction.

Polarisation de la lumière.

1556. Nous avons dit, en commençant l'exposition du système des ondulations, que Fresnel avait supposé que les mouvements vibratoires de l'éther avaient lieu, non pas dans la direction du mouvement de propagation, comme dans la transmission du son, mais parallèlement à la surface même des ondes. Dans ce qui précède nous n'avons point rappelé ce principe, parce que les phénomènes étaient les mêmes, quelque direction qu'on ait supposée aux mouvements vibratoires. Mais l'explication de tous les phénomènes relatifs à la polarisation dépend de la direction des mouvements vibratoires de l'éther.

Des expériences décisives (1557) démontrent la réalité de ces mouvements transversaux et leur parallélisme dans la lumière polarisée, et les phénomènes des plaques cristallisées (1570) que ces mouvements sont perpendiculaires au plan de polarisation. Alors, si on admet que les corps lumineux éprouvent à chaque instant des perturbations qui changent continuellement la direction du plan de polarisation de la lumière, de sorte que, dans un intervalle de temps très-court, ils émettent autant de lumière polarisée dans un certain plan que dans un plan perpendiculaire, cette lumière se comportera comme un faisceau de lumière formé de deux autres de même intensité, polarisés dans deux plans rectangulaires, et par suite elle ne pourra donner naissance à aucun des phénomènes que présente la lumière polarisée dans un seul plan, puisque les apparences sont toujours complémentaires quand les plans primitifs

Digitized by Google

de polarisation sont rectangulaires. D'après cela, dans la polarisation de la lumière par la réflexion ou la réfraction simple ou double, l'action des corps consiste uniquement à ramener les mouvements de l'éther en totalité ou en partie dans un même plan.

1557. La direction du mouvement oscillatoire dans les ondes lumineuses peut être déterminée par l'expérience. En effet, cette direction est nécessairement parallèle ou perpendiculaire à la surface de l'onde; mais dans le premier cas, et dans ce cas seulement, si la polarisation consiste dans le parallélisme des petits mouvements, en faisant interférer deux faisceaux de lumière homogène polarisés dans deux plans rectangulaires, il ne se produira pas de franges, quelle que soit d'ailleurs la différence des chemins parcourus : car le mouvement résultant sera toujours égal à la racine carrée des vitesses des ondes élémentaires, et l'intensité de la lumière en un point quelconque de l'espace éclairé par les deux faisceaux sera égale à la somme des intensités de la lumière apportée par chacun des faisceaux. Voici maintenant les expériences faites par Fresnel.

Considérons un faisceau de lumière introduit dans une chambre obscure à travers deux fentes parallèles : si dans chaque faisceau on place une pile égale de lames minces de mica, sous une assez grande inclinaison pour le polariser presque complétement, et de manière que les plans d'incidence soient perpendiculaires entre eux, les franges disparaissent; elles se reproduisent quand les plans cessent d'être perpendiculaires, et avec un éclat qui croît à mesure que les plans approchent du parallélisme. Ainsi les rayons de lumière polarisés suivant le même plan s'influencent comme les rayons de lumière non modifiée; mais cette influence diminue à mesure que les plans de polarisation s'écartent l'un de l'autre, et devient nulle quand ils sont rectangulaires. L'expérience suivante conduit encore à la même conséquence.

On prend une lame de sulfate de chaux ou de cristal de roche parallèle à l'axe, et d'une épaisseur bien uniforme; on la coupe en deux, et l'on place chacune des moitiés sur une des fentes de l'écran. Supposons qu'on ait tourné ces deux moitiés de manière que les bords qui étaient contigus dans la lame avant sa division soient restés parallèles, les axes le seront aussi : or, dans ce cas, on n'aperçoit qu'un seul groupe de franges au milieu de l'espace éclairé, comme avant l'interposition de la lame. Mais si on fait tourner une de ces deux moitiés dans son plan, en dérangeant ainsi le parallélisme, on fait naître deux autres groupes plus faibles, situés l'un à droite, l'autre à gauche du groupe du milieu, et qui en sont complétement séparés dans la lumière blanche lorsque les lames ont seulement un millimètre d'épaisseur. Il est à remarquer que le nombre de largeurs de franges comprises entre le milieu d'un de ces groupes et celui du groupe central est proportionnel à l'épaisseur des lames pour des cristaux de même nature, ou dont la double réfraction a la même énergie, comme le cristal de roche et la chaux sulfatée. A mesure que l'angle des deux axes augmente, ces nouveaux groupes de franges deviennent de plus en plus prononcés, et atteignent enfin leur maximum d'intensité quand les axes des deux lames sont perpendiculaires entre eux : alors le groupe central, qui s'était affaibli graduellement, a tout à fait disparu, et est remplacé par une lumière uniforme. Il faut en conclure que les rayons qui les produisent par leur interférence ne sont plus capables de s'influencer mutuellement. Il est aisé de voir, d'après la position des franges, qu'elles résultent de l'interférence des rayons qui ont subi le même mode de réfraction dans les deux lames, puisque, les ayant parcourues avec des vitesses égales, ils doivent arriver simultanément dans le milieu de l'espace éclairé qui répond à des chemins égaux, si d'ailleurs les deux lames sont de même épaisseur et restent toujours l'une et l'autre perpendiculaires aux rayons, comme nous le supposons ici. Ainsi les franges du groupe

Digitized by Google

central étaient formées par la superposition de celles qui résultaient 1° de l'interférence des rayons ordinaires de la lame de gauche avec les rayons ordinaires de la lame de droite; 2° de l'interférence des rayons extraordinaires de la première lame avec les rayons extraordinaires de la seconde. Les deux groupes excentriques au contraire résultent de l'interférence des rayons qui ont subi des réfractions différentes dans les deux lames; et comme ce sont les rayons ordinaires qui marchent le plus vite dans le cristal de roche ou le sulfate de chaux, on voit que, si on emploie une de ces deux espèces de cristaux, le groupe de gauche doit être formé par la réunion des rayons extraordinaires de la lame de gauche avec les rayons ordinaires de la lame de droite, et le groupe de droite par la réunion des rayons extraordinaires de la lame de droite avec les rayons ordinaires de la lame de gauche. Or, quand les axes des deux lames étaient parallèles, les rayons qui avaient éprouvé les mêmes réfractions dans les deux cristaux se trouvaient polarisés suivant la même direction, et ceux de noms contraires suivant des directions rectangulaires : voilà pourquoi le groupe de franges du milieu, qui provient de l'interférence des rayons de même nom, était à son maximum d'intensité, et les autres, qui résultent de l'interférence des rayons de noms contraires, ne paraissaient pas encore. Mais quand les axes des deux lames formaient entre eux un angle oblique, de 45° par exemple, les rayons de noms contraires et ceux de même nom pouvaient agir à la fois les uns sur les autres, puisque leurs plans de polarisation n'étaient plus rectangulaires, et les trois groupes de franges étaient produits. Lorsque enfin les axes deviennent perpendiculaires entre eux, les rayons de même nom se trouvent polarisés suivant les directions rectangulaires, et le groupe central auquel ils donnaient naissance s'évanouit, tandis que les rayons ordinaires de la lame de gauche sont alors polarisés parallèlement aux rayons extraordinaires de la lame de droite; ce qui fait que le groupe de droite qu'ils produisent atteint son maximum d'intensité. Il en est de même du groupe de gauche, résultant de l'interférence des rayons ordinaires de la lame de droite avec les rayons extraordinaires de la lame de gauche.

Nous rapporterons enfin une dernière expérience qui conduit aux mêmes conséquences. Si, après avoir fait polir un rhomboïde de chaux carbonatée sur deux faces opposées, dressées avec soin et bien parallèles, on le scie perpendiculairement à ces faces, on obtient deux rhomboïdes d'égale épaisseur, et dans lesquels la marche des rayons ordinaires et extraordinaires est exactement pareille sous la même incidence. En les plaçant l'un devant l'autre, de manière que les rayons partis du point lumineux qui avaient traversé le premier rhomboïde parcourussent ensuite le second, et que leurs faces fussent perpendiculaires à la direction des rayons incidents, les sections principales étant à angle droit, les quatre faisceaux que produisent en général les deux rhomboïdes étaient réduits à deux; le faisceau ordinaire du premier rhomboïde était réfracté extraordinairement dans le second, et le faisceau extraordinaire de celui-là était réfracté ordinairement dans celui-ci. Il résulte de cette disposition que les différences de marche provenant de la différence de vitesse des rayons ordinaires et extraordinaires se trouvent compensées pour les deux faisceaux sortant. Ils se croisent d'ailleurs sous un angle très-petit, et tel que les franges doivent avoir une largeur beaucoup plus que suffisante pour être aperçues; et cependant, quoique toutes les conditions nécessaires à la production des franges pour les circonstances ordinaires soient observées, il est impossible de parvenir à les faire paraître.

Il est donc complétement démontré que les rayons polarisés à angle droit n'exercent aucune influence l'un sur l'autre, et par conséquent que les mouvements de l'éther ont lieu dans le plan de l'onde, et dans une même direction quand la lumière est polarisée.

Digitized by Google

1558. Fresnel, en partant de certaines hypothèses très-probables, est parvenu à des formules qui représentent, avec une admirable précision, les intensités des rayons réfléchis ou réfractés, et d'où résultent, non-seulement les phénomènes généraux de polarisation qui se produisent par la réflexion et la réfraction ordinaires, mais encore toutes les lois observées. Un faisceau de lumière naturelle pouvant être considéré comme composé de deux faisceaux d'égale intensité polarisés dans deux directions rectangulaires, disposés d'une manière quelconque, pour arriver à la détermination des phénomènes que présente la lumière naturelle quand elle se réfléchit à la surface des corps ou les traverse, il faut d'abord étudier les modifications que ces circonstances apportent à la lumière complétement polarisée.

1559. *Détermination de l'intensité des rayons réfléchis et réfractés lorsque le rayon incident est complétement polarisé dans le plan d'incidence.* Fresnel, pour résoudre cette question, admet 1° que, dans la communication du mouvement de l'éther du premier milieu à celui du second, la force vive de l'onde incidente est égale à la somme des forces vives de l'onde réfléchie et de l'onde réfractée, c'est-à-dire que le produit de la masse de l'onde incidente, multiplié par le carré de la vitesse de vibration, est égal à la somme des produits des masses des ondes incidentes et réfractées multipliées par les carrés des vitesses respectives; c'est un principe général de mécanique qui existe dans tout système de points matériels dont les vitesses ne varient en grandeur et en direction qu'en vertu de leurs liaisons mutuelles, et qui est applicable au choc des corps parfaitement élastiques; 2° que les molécules de l'éther du premier et du second milieu qui sont voisines de la surface de séparation des deux milieux exécutent des oscillations de même amplitude, et que cette vitesse commune est égale à la somme des vitesses de l'éther dans l'onde incidente et dans l'onde réfléchie, ou à celle de l'onde transmise, mais toutes décomposées parallèlement à la surface. Ce dernier principe n'est point évident, et n'a point été démontré.

A l'aide de ces deux principes, il est facile de trouver l'intensité de l'onde réfléchie : en effet, si nous désignons par i et r les angles d'incidence et de réflexion, par 1 la vitesse de vibration dans le *rayon incident*, par v et u les vitesses correspondantes dans les rayons réfléchis et réfractés, *nous aurons*, en vertu du deuxième principe, dans le cas dont il s'agit, où les mouvements sont perpendiculaires au plan d'incidence,

$$u = v + 1... \qquad (a)$$

Pour obtenir l'équation relative à la conservation des forces vives, il faut d'abord déterminer les masses des ondes incidentes réfléchies et réfractées : or, les largeurs des faisceaux incidents et réfractés sont représentées par les lignes GI et DM (*fig.* 921); et, comme on a $GI = GD \cos i$ et $DM = GD \cos r$, il s'ensuit que ces largeurs sont proportionnelles à $\cos i$ et $\cos r$. Les hauteurs des ondes incidentes et réfractées étant les longueurs d'ondulation dans le premier et le second milieu, et ces longueurs étant proportionnelles à $\sin i$ et à $\sin r$, il s'ensuit que les volumes d'éther de l'onde incidente et de l'onde réfractée, entre lesquels la communication du mouvement a lieu, sont proportionnels à $\cos i \sin i$ et à $\cos r \sin r$; et les masses seront proportionnelles à $d \cos i \sin i$ et à $d' \cos r \sin r$, d et d' étant les densités de l'éther dans le premier et le second milieu. Mais dans la communication du mouvement dans un fluide élastique on a $v^2 = e : d$, e représentant l'élasticité du fluide et d sa densité; si on suppose que dans les différents corps l'éther ne diffère que par la densité, et que son élasticité reste constante, la densité sera en raison inverse du carré de la vitesse de propagation du mouvement, ou proportionnelle à $1 : \sin^2 i$ et $1 : \sin^2 r$. Par conséquent les masses d'éther des deux milieux seront proportionnelles à

$$\frac{\sin i \cos i}{\sin^2 i} \text{ et } \frac{\sin r \cos r}{\sin^2 r}, \text{ ou à } \frac{\cos i}{\sin i} \text{ et } \frac{\cos r}{\sin r}.$$

Digitized by Google

D'après cela, le principe de la conservation des forces vives donne

$$\frac{\cos i}{\sin i} = \frac{\cos r}{\sin r} u^2 + \frac{\cos i}{\sin i} v^2, \quad \text{ou} \quad \frac{\cos i}{\sin i}(1 - v^2) = \frac{\cos r}{\sin r} u^2. \qquad (b)$$

En éliminant successivement u et v entre les équations (a) et (b), on trouve

$$v = \frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)} \quad \text{et} \quad u = \frac{2 \sin r \cos i}{\sin(i + r)};$$

alors, en désignant par R l'intensité du rayon réfléchi, et par T celle du rayon transmis, comme ces intensités sont proportionnelles aux carrés des vitesses, on a

$$R = \frac{\sin^2(i - r)}{\sin^2(i + r)} \ldots (1) \quad \text{et} \quad T = \frac{4 \cos^2 i \sin^2 r}{\sin^2(i + r)} \ldots (2)$$

Si on remplace dans ces formules $\sin r$ par sa valeur tirée de la relation $\sin i = n \sin r$, on trouve

$$R = \left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \cos i}\right)^2 \quad \text{et} \quad T = 1 - R.$$

Si dans cette dernière formule on fait $i = 0$, on trouve $R = (n - 1)^2 : (n + 1)^2$; et pour $i = 90$, on a $R = 1$. Il est facile, en outre, de reconnaître au moyen de la formule (1) que, si on fait croître i d'une manière continue de 0 à 90°, la valeur de R ira constamment en croissant : en effet, $\sin(i - r)$ est plus grand que $\sin i - \sin r = \sin r(n - 1)$, et d'autant plus que l'angle r est plus grand; $\sin(i + r)$ est au contraire toujours plus petit que $\sin i + \sin r = \sin r(n + 1)$, et d'autant plus que r est plus grand. Donc, à mesure que i augmente, $\sin(i - r)$ prend des valeurs qui excèdent toujours davantage $\sin r(n - 1)$, et $\sin(i + r)$ prend des valeurs qui sont toujours, de plus en plus, plus petites que $\sin r(n + 1)$: ainsi la valeur de la fraction $\sin(i - r) : \sin(i + r)$ va constamment en croissant. Quant aux variations d'intensité du rayon réfracté, elles se déduisent de celles du rayon incident, car les intensités de ces deux rayons sont complémentaires.

Les formules (1) et (2) peuvent s'obtenir au moyen de celles du choc des corps élastiques. En effet, en désignant par m et m' deux masses, dont la première est animée d'une vitesse représentée par l'unité et la seconde en repos, nous avons vu (147) que les vitesses des deux masses après le choc étaient

$$v = \frac{m - m'}{m + m'} \quad \text{et} \quad u = \frac{2m}{m + m'}.$$

En remplaçant dans ces deux formules m et m' par leurs valeurs $\cos i : \sin i$ et $\cos r : \sin r$ trouvées plus haut, on retrouve les formules précédentes.

1560. *Détermination de l'intensité des rayons réfléchis et réfractés lorsque le rayon incident est complétement polarisé dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence.* Dans ce cas, Fresnel admet les mêmes suppositions que dans le cas précédent; mais alors les molécules d'éther des deux milieux, voisines de la surface, ont pour vitesse, celle du premier milieu la somme des composantes parallèles à la surface des vitesses de l'éther dans le rayon incident et le rayon réfléchi, et celles du deuxième milieu la composante parallèle au même plan des vitesses de l'onde réfractée : alors on a les équations

$$\cos i(v + 1) = u \cos r,$$

$$\frac{\cos i}{\sin i} = \frac{\cos i}{\sin i} v^2 + \frac{\cos r}{\sin r} u^2 \quad \text{ou} \quad \frac{\cos i}{\sin i}(1 - v^2) = \frac{\cos r}{\sin r} u^2.$$

Digitized by Google

En éliminant successivement u et v entre ces deux équations, on trouve

$$v = \frac{\sin r \cos r - \sin i \cos i}{\sin r \cos r + \sin i \cos i} = -\frac{\tang(i-r)}{\tang(i+r)}$$

et

$$u = \frac{2 \sin r \cos i}{\sin r \cos r + \sin i \cos i}.$$

Ainsi, en désignant par R et par T les intensités des rayons réfléchis et réfractés, on a

$$R = \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)} \ldots \quad (3) \quad \text{et} \quad T = \frac{4 \sin^2 r \cos^2 i}{(\sin r \cos r + \sin i \cos i)^2} \ldots \quad (4).$$

Si on remplace dans ces formules $\sin r$ par sa valeur déduite de la relation $\sin i = n \sin r$, il vient

$$R = \left(\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - n^2 \cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + n^2 \cos i}\right)^2 \quad \text{et} \quad T = 1 - R.$$

Si on suppose $i = 0$, il vient $R = (n-1)^2 : (n+1)^2$. Ainsi, lorsque le rayon incident est normal, l'intensité du rayon réfléchi est la même quand le rayon incident est polarisé parallèlement ou perpendiculairement au plan d'incidence : il est d'ailleurs facile de voir qu'il doit en être ainsi, car, la surface du corps étant parallèle aux ondes, la direction des mouvements vibratoires est sans influence. Lorsqu'on suppose $i = 90°$, on a $R = 1$, comme dans le cas où le rayon incident est complétement polarisé dans le plan d'incidence ; mais ici l'intensité du rayon réfléchi n'augmente pas d'une manière continue de $i = 0$ à $i = 90°$, car, pour $i + r = 90°$, l'équation (3) donne $R = 0$: c'est ce qui devait être, car nous savons qu'alors la réflexion est nulle.

1561. *Détermination de l'intensité des rayons réfléchis lorsque le rayon incident est polarisé dans un plan quelconque.* A l'aide des formules (1), (2), (3), (4), on peut facilement trouver les intensités des rayons réfléchis ou réfractés dans toutes les circonstances possibles. Nous nous occuperons d'abord des rayons réfléchis.

Supposons d'abord que le rayon incident soit complétement polarisé, mais que son plan de polarisation fasse un angle A avec le plan d'incidence : ce faisceau pourra évidemment être considéré comme composé de deux faisceaux polarisés, l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire, et ayant pour intensités $\cos^2 A$ et $\sin^2 A$. Alors l'intensité R du faisceau réfléchi sera donnée par la formule

$$R = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \cos^2 A + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)} \sin^2 A. \quad (5)$$

Si la lumière était complétement polarisée dans le plan d'incidence, on aurait $A = 0$, et on retomberait sur la formule (1). Si le faisceau était au contraire polarisé dans un plan perpendiculaire, on aurait $A = 90°$, et on retrouverait la formule (3); et si, dans ce dernier cas, l'angle de réflexion était celui de la polarisation complète, on aurait $i + r = 90°$, d'où $\tang(i+r) = \infty$, et par suite $R = 0$.

Si la lumière incidente était complétement polarisée dans un plan incliné de 45° sur le plan d'incidence, on aurait $\cos^2 A = \sin^2 A = \frac{1}{2}$, et par conséquent

$$R = \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\right]. \quad (6)$$

Ce dernier résultat est le même que celui qu'on obtiendrait en supposant la lumière incidente composée de deux faisceaux ayant chacun l'intensité $1/2$, et polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire. On arriverait aussi exactement à la même

Digitized by Google

formule en considérant le faisceau incident comme composé de deux faisceaux d'intensité 1/2, polarisés dans deux plans rectangulaires disposés d'une manière quelconque par rapport au plan de réflexion : car, en désignant par A et A' les angles de ces plans avec le plan d'incidence, on aurait

$$R = \frac{1}{2}\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}(\cos^2 A + \cos^2 A') + \frac{1}{2}\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}(\sin^2 A + \sin^2 A');$$

mais, comme les angles A et A' sont complémentaires, A et A' disparaissent, et on retombe sur la formule (6).

Si la lumière incidente était naturelle, on pourrait toujours la considérer comme composée de deux faisceaux ayant chacun une intensité 1/2, et polarisés dans deux plans rectangulaires quelconques : par conséquent la formule (6) est applicable à la réflexion de la lumière naturelle.

Si on suppose la lumière naturelle, et qu'après avoir éliminé r dans l'équation (6) au moyen de la relation $n' \sin i = n \sin r$, n et n' étant les indices des deux milieux, on fasse successivement $i = 0$, $i + r = 90°$ et $i = 90$, on trouve pour les intensités des rayons réfléchis.

$$\left(\frac{n'-n}{n+n'}\right)^2, \quad \frac{1}{2}\left(\frac{n'^2-n^2}{n^2+n'^2}\right)^2 \quad \text{et} \quad 1.$$

Ainsi l'intensité du rayon réfléchi augmente avec l'inclinaison : par exemple, pour le verre ordinaire, dont l'indice est 3/2, en supposant que le milieu environnant soit de l'air, les quantités de lumière réfléchie sous ces trois indices sont 0,04 ; 0,148 et 1.

On pourrait facilement, d'après ce qui précède, trouver la somme des intensités des rayons de lumière naturelle qui seraient réfléchis perpendiculairement par une plaque à faces parallèles après un nombre quelconque de réflexions : car, en désignant par r^2 l'intensité du rayon réfléchi à la première surface, les intensités des rayons émergents après 1, 3, 5, 7, réflexions, seront

$$r^2, \quad (1-r^2)^2 r^2, \quad (1-r^2)^2 r^6, \quad (1-r^2)^2 r^{10}, \quad (1-r^2)^2 r^{14};$$

et la somme de ces intensités sera

$$r^2 + (1-r^2)^2 r^2 (1 + r^4 + r^8 + \ldots) = \frac{(n-n')^2}{n^2+n'^2}.$$

En appliquant cette formule au verre ordinaire, au cristal de roche, au sel gemme, à l'eau et au diamant, pour lesquels les indices sont 3/2, 25/16, 17/11, 53/40, 100/41, et en supposant que le premier milieu soit de l'air, on trouve les résultats suivants.

	Réflexion à la première surface.	Réflexion totale d'une plaque à faces parallèles.
Verre commun	0,040	0,077
Cristal de roche	0,048	0,091
Eau	0,0195	0,038
Diamant	0,175	0,297
Sel gemme	0,045	0,087

On voit à l'inspection de ces nombres la cause de l'éclat du diamant. Les nombres de la dernière colonne qui sont relatifs au verre commun, au cristal de roche et au sel gemme sont très-voisins de ceux que M. Melloni a trouvés pour la quantité de chaleur réfléchie. Ces derniers nombres sont, comme nous l'avons dit, 0,084, 0,081 et 0,08. Ce rapprochement semblerait indiquer que les indices de réfraction des rayons calorifiques sont les mêmes ou du moins diffèrent peu de ceux de la lumière.

Enfin, si la lumière incidente se composait de lumière naturelle et de lumière polarisée, en

Digitized by Google

désignant par k l'intensité du faisceau polarisé, l'intensité du faisceau naturel sera $1 - k$, et ce dernier pouvant être considéré comme composé de deux faisceaux ayant chacun pour intensité $\frac{1-k}{2}$, et polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire, on aura

$$T = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\left(k\cos^2 A + \frac{1-k}{2}\right) + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\left(k\sin^2 A + \frac{1-k}{2}\right). \quad (7)$$

1562. *Mouvement du plan de polarisation produit par la réflexion.* Lorsqu'un rayon de lumière polarisée se réfléchit sur une surface polie, le plan de polarisation du rayon réfléchi n'a pas, en général, la même position que celui du rayon incident; mais il est facile de la déterminer. Il est d'abord évident que, si la lumière incidente était polarisée dans le plan d'incidence ou dans un plan perpendiculaire, le rayon réfléchi serait polarisé dans la même direction : car, dans l'un et l'autre cas, le plan de réflexion étant symétriquement placé relativement aux mouvements vibratoires, il n'y a pas de raison pour que la direction de ces mouvements change plutôt dans un sens que dans l'autre. Supposons maintenant que le plan de polarisation du rayon incident fasse un angle A avec le plan d'incidence, on pourra considérer le rayon incident comme composé de deux rayons polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre dans un plan perpendiculaire, ayant le premier une vitesse de vibration représentée par $\cos A$ et l'autre par $\sin A$; le premier donnera un rayon réfléchi dans lequel la vitesse de vibration sera $\cos A \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)}$, et le second un autre rayon réfléchi ayant une vitesse de vibration représentée par $\sin A \frac{\tang(i-r)}{\tang(i+r)}$. Mais, si on désigne par A' l'angle du plan de polarisation du rayon réfléchi avec le plan de réflexion, la direction de ce plan sera celle de la résultante des mouvements dans les deux faisceaux élémentaires réfléchis, polarisés dans le plan de réflexion et dans un plan perpendiculaire : on aura donc

$$\tang A' = \frac{\sin A}{\cos A} \times \frac{\tang(i-r)}{\tang(i+r)} \times \frac{\sin(i+r)}{\sin(i-r)} \quad \text{ou} \quad \tang A' = \tang A \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)}. \quad (8)$$

Il résulte de cette formule que la direction du plan de polarisation du rayon réfléchi ne coïncide avec celui du rayon incident qu'autant que A est égal à 0° ou à 90°, ou bien que, A étant quelconque, on a $\cos(i+r) = \cos(i-r)$, ce qui exige que $i = 0$ ou $i = 90°$.

On voit aussi, à l'inspection de cette formule, que A' est toujours plus petit que A, car, les angles i et r étant toujours $<$ que 90°, $\cos(i+r)$ est $<$ que $\cos(i-r)$: ainsi la réflexion rapproche toujours le plan de polarisation du plan d'incidence. Lorsque la réflexion a lieu sous un angle tel que $i + r = 90°$, $A' = 0$: ainsi, sous l'angle de la polarisation complète, le rayon réfléchi est polarisé dans le plan d'incidence, quelle que soit la direction du plan de polarisation du rayon incident.

Si le rayon incident était formé de lumière naturelle, on pourrait le considérer comme composé de deux faisceaux égaux, polarisés dans deux plans rectangulaires : alors le rayon réfléchi sera composé de deux faisceaux polarisés dans deux plans qui seront plus rapprochés du plan d'incidence, et qui coïncideraient avec lui si la réflexion a lieu sous un angle tel que $i + r = 90°$. Si on considère chacun des plans primitifs de polarisation comme étant incliné de 45° sur le plan d'incidence, la formule (8) devient

$$\tang A' = \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)}.$$

En discutant cette formule, il est facile de voir que, sous l'incidence perpendiculaire, les plans de polarisation des deux faisceaux réfléchis sont inclinés de 45° sur le plan de réflexion, et par conséquent sont perpendiculaires entre eux : ainsi le rayon réfléchi est à l'état naturel comme le rayon incident; mais, à mesure que l'angle d'incidence augmente, les deux plans de

Digitized by Google

polarisation se rapprochent du plan d'incidence, et coïncident avec lui lorsque $i+r=90°$. Au delà de cette incidence les plans de polarisation s'éloignent du plan d'incidence, mais en tournant dans le même sens, car $\cos(i+r)$ change de signe; enfin, pour l'incidence de 90°, les plans de polarisation redeviennent de nouveau rectangulaires, et le rayon réfléchi reprend les propriétés de la lumière naturelle.

1563. *Détermination de la quantité de lumière polarisée dans le plan d'incidence qui se trouve dans le rayon réfléchi.* Considérons un faisceau de lumière entièrement polarisé dans l'azimut A, on a

$$R=\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\cos^2 A+\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\sin^2 A\ldots$$

et

$$\tang A'=\tang A\frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)}\ldots$$

Or, la quantité de lumière polarisée est égale à la différence des quantités de lumière polarisée dans le plan d'incidence et dans un plan perpendiculaire : par conséquent, en désignant cette quantité par K, on aura

$$K=R(\cos^2 A'-\sin^2 A')=R(1-2\sin^2 A')\ldots$$

En combinant les trois dernières équations, on trouve pour la quantité de lumière polarisée la valeur suivante :

$$K=\left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\cos^2 A+\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\sin^2 A\right]$$
$$\left[\frac{\cos^2(i-r)-\tang^2 A\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)+\tang^2 A\cos^2(i+r)}\right]. \qquad (9)$$

Si la lumière incidente était naturelle, il faudrait la considérer comme étant composée de deux faisceaux ayant une intensité 1/2, et polarisés dans des plans inclinés à 45° sur le plan d'incidence : alors on a

$$\cos^2 A=\sin^2 A=\frac{1}{2},$$

et la formule précédente devient

$$K=\frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}+\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\right]$$
$$\left[\frac{\cos^2(i-r)-\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)+\cos^2(i+r)}\right]. \qquad (10)$$

M. Arago a vérifié l'exactitude de cette dernière formule, en déterminant par des expériences nombreuses les incidences sous lesquelles le rayon réfléchi renfermait la même quantité de lumière polarisée, et les résultats des expériences faites sur différentes espèces de verre et sur l'eau s'accordent très-bien avec la formule.

Si le rayon incident, toujours formé de lumière naturelle, était perpendiculaire à la surface réfléchissante, il faudrait faire $i=0$ dans la dernière formule, qui deviendrait alors $K=0$. On obtient le même résultat en supposant $i=90$. Ces deux cas particuliers de la formule ont aussi été vérifiés par l'expérience.

Enfin, si on pose $i+r=90$, la formule devient

$$K=\frac{1}{2}\sin^2(i-r),$$

Digitized by Google

résultat identiquement le même que celui que donne la formule (6) qui représente l'intensité totale de la lumière réfléchie : la loi de Brewster est alors une conséquence de la théorie.

Si la lumière incidente était complétement polarisée dans le plan d'incidence, on aurait $A = 0$, et la formule devient

$$K = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}.$$

La valeur de K étant la même que celle que l'on obtient dans les mêmes circonstances pour l'intensité totale du rayon réfléchi, il s'ensuit que le rayon est complétement polarisé dans le plan primitif.

Si le rayon incident était polarisé dans un plan *perpendiculaire au plan d'incidence*, on aurait $A = 90°$,

et
$$K = -\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}.$$

Le signe — indique que la lumière est polarisée dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence; et, comme cette valeur de K est la même que celle qu'on obtient dans le même cas pour l'intensité totale du rayon réfléchi, il s'ensuit que le rayon réfléchi est complétement polarisé dans le plan primitif. Si $i + r = 90°$, la valeur de K devient nulle, comme on devait s'y attendre.

Si le rayon incident était seulement en partie polarisé, il serait également très-facile de trouver l'intensité du rayon et la direction du nouveau plan de polarisation, en considérant la lumière comme composée de deux faisceaux, l'un de lumière naturelle, l'autre de lumière complétement polarisée.

1564. *Polarisation par des réflexions successives.* Lorsqu'un rayon de lumière naturelle se réfléchit sous une incidence différente de celle qui produit la polarisation complète, nous savons qu'il se polarise en partie; ou, en considérant la lumière naturelle comme formée de deux faisceaux d'égale intensité, polarisés dans des plans inclinés de 45° sur le plan de réflexion, que ces plans se rapprochent du plan d'incidence par le seul fait de la réflexion : on conçoit alors que, si le rayon éprouve une suite de réflexions, les plans de polarisation, se rapprochant toujours davantage du plan d'incidence, finiront, après un nombre suffisant de réflexions, par coïncider avec lui, et alors la lumière se trouvera complétement polarisée.

La formule (8) permet de calculer la position des plans de polarisation après un nombre quelconque de réflexions. Si nous supposons que la réflexion ait lieu entre deux surfaces parallèles, de manière que les angles de réflexion soient les mêmes, en désignant par A', A'', A'''..., les azimuts des plans de polarisation après 1, 2, 3..., réflexions, nous aurons évidemment

$$\tang A' = \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)},$$

$$\tang A'' = \tang A' \quad \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)} = \frac{\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)},$$

$$\tang A''' = \tang A'' \quad \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)} = \frac{\cos^3(i+r)}{\cos^3(i-r)},$$

. . . . . .

$$\tang A^{(n)} = \tang A^{(n-1)} \frac{\cos(i+r)}{\cos(i-r)} = \frac{\cos^n(i+r)}{\cos^n(i-r)}.$$

Cos $(i + r)$ étant toujours plus petit que cos $(i - r)$, on voit que l'azimut du plan de polarisation va en diminuant à mesure que le nombre de réflexions augmente; mais, comme cet

Digitized by Google

angle ne peut jamais devenir nul, la polarisation ne peut jamais devenir complète quand $i + r$ diffère de 90°. Cependant, l'azimut des plans de polarisation devenant très-petit après un nombre de réflexions qui n'est jamais très-considérable, la polarisation devient alors presque totale. M. Brewster a vérifié ces résultats théoriques par une expérience sur le verre ; il a reconnu qu'après cinq réflexions sous un angle de 70°, la polarisation était complète : or, la formule donne alors 22′ pour l'azimut des plans de polarisation.

On pourrait facilement trouver la position des plans de polarisation dans le cas où les angles d'incidence seraient variables, et où les substances réfléchissantes seraient différentes.

Toutes les questions que nous venons de traiter pour le rayon réfléchi peuvent se résoudre de la même manière pour le rayon réfracté.

1565. *Intensité du rayon réfracté.* La formule générale qui représente l'intensité du rayon transmis peut se déduire des formules qui représentent cette intensité dans le cas où le rayon incident est polarisé ou dans un plan perpendiculaire; mais il est plus simple de prendre le complément du rayon réfléchi; on aura ainsi

$$T = 1 - \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\cos^2 A - \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\sin^2 A,$$

et, dans le cas de la lumière naturelle,

$$T = 1 - \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} + \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\right].$$

Sous l'incidence perpendiculaire et sous l'angle de polarisation on trouve

$$T = 1 - \frac{(n'-n)^2}{(n'+n)^2} \quad \text{et} \quad T = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{n'^2-n^2}{n^2+n'^2}\right).$$

1566. *Quantité de lumière polarisée qui se trouve dans le rayon réfracté.* On pourrait déterminer cette quantité par la même méthode que nous avons employée pour la réflexion ; mais il est beaucoup plus simple de la déduire de celle qui se trouve polarisée par réflexion dans le plan d'incidence et dans le plan perpendiculaire, car les quantités de lumière polarisées dans chacun de ces plans qui se trouvent dans le rayon réfléchi et dans le rayon réfracté sont complémentaires : ainsi, en désignant par A l'azimut du plan de polarisation du rayon incident, on aura pour la quantité de lumière polarisée dans un plan perpendiculaire au plan d'incidence,

$$K = \sin^2 A\left[1 - \frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}\right] - \cos^2 A\left[1 - \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}\right],$$

et, dans le cas où la lumière incidente est naturelle,

$$K = \frac{1}{2}\frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} - \frac{1}{2}\frac{\tang^2(i-r)}{\tang^2(i+r)}.$$

Cette dernière valeur de K est la même que celle qu'on trouverait directement pour la quantité de lumière du rayon réfléchi polarisée dans le plan d'incidence, et elle est équivalente à celle que nous avons donnée en parlant de l'angle du plan de polarisation du rayon réfléchi. Ainsi, pour la lumière naturelle, il y a autant de lumière polarisée dans le rayon réfracté que dans le rayon transmis. C'est la loi qui avait été découverte par M. Arago longtemps avant que la théorie l'ait indiquée.

1567. *Mouvement du plan de polarisation produit par la réfraction.* Le rayon incident, étant polarisé dans un plan formant avec le plan d'incidence un angle A, pourra être considéré comme composé de deux rayons polarisés l'un dans le plan d'incidence, l'autre

Digitized by Google

dans un plan perpendiculaire, et dont les vitesses de vibration seraient $\cos A$ et $\sin A$; chacun de ces rayons donnera des rayons transmis dont les vitesses de vibration seront

$$\cos A \times \frac{2 \sin r \cos i}{\sin (i + r)} \quad \text{et} \quad \sin A \times \frac{2 \sin r \cos i}{\sin (i + r) \cos (i - r)};$$

en remarquant que

$$\sin i \cos i + \sin r \cos r = \sin (i + r) \cos (i - r);$$

d'où l'on déduit facilement que l'angle A' de la résultante avec le plan d'incidence, c'est-à-dire l'azimut du plan de polarisation du rayon transmis, est donné par l'équation

$$\cot A' = \cot A \cos (i - r).$$

Si la lumière était naturelle, pour chacun de ses plans de polarisation il faudrait poser $A = 45°$, d'où $\cot A = 1$, et la formule deviendrait

$$\cot A' = \cos (i - r).$$

En supposant que le rayon incident soit d'abord perpendiculaire à la surface du corps, et qu'il s'incline toujours davantage, $i - r$ ira en augmentant, $\cos (i - r)$ en diminuant, et A' en augmentant. La formule générale et la formule relative au cas particulier de la lumière non polarisée ont été données d'abord par M. Brewster comme résultats de l'expérience; il se servait d'un prisme disposé de manière que le rayon transmis rencontrait perpendiculairement la seconde surface : alors le rayon émergent avait le même plan de polarisation que le rayon réfracté.

Si le rayon sortait dans l'air par une surface parallèle à la première, en désignant par A'' l'azimut du plan de polarisation du rayon émergent, et observant que

$$\cos (i - r) = \cos (r - i),$$

il viendrait $\cot A'' = \cot A' \cos (i - r) = \cot A \cos^2 (i - r)$,

et, pour les deux plans de polarisation de la lumière naturelle,

$$\cot A'' = \cos^2 (i - r).$$

M. Brewster a vérifié ces deux formules par un grand nombre d'observations.

Si un faisceau de lumière naturelle traversait successivement une série de plaques parallèles, l'azimut des plans de polarisation du dernier rayon émergent serait donné par la formule

$$\cot A^{(n)} = \cos^n (i - r).$$

$i - r$ étant une quantité $<$ que 90°, $A^{(n)}$ s'approche toujours davantage de l'angle droit à mesure que n augmente, mais sans jamais lui être égal. Mais quand la différence est très-petite, les deux plans partiels de polarisation coïncident sensiblement, et la lumière réfractée paraît complétement polarisée dans un plan perpendiculaire au plan de réfraction. Par exemple, M. Brewster a trouvé que la lumière était complétement polarisée par des piles de 8, 24 et 47 plaques de verre, sous des incidences de 78° 52′ pour la première, de 61° pour la seconde et de 45° 34′ pour la troisième; la formule donne pour les azimuts des plans de polarisation des rayons émergents 88° 50′, 89° 38′ et 88° 27′.

1568. Pour résumer tout ce que nous venons de dire sur la polarisation par réflexion et par réfraction, conservons les notations précédentes, désignons par r et r' les quantités de lumière du rayon réfléchi polarisées dans le plan d'incidence et dans un plan perpendiculaire, par t et t' les quantités analogues pour le rayon réfracté, et posons

Digitized by Google

$$a = \sin(i - r) : \sin(i + r) \quad \text{et} \quad b = \tang(i - r)\tang(i + i),$$

nous aurons

$$r = a^2 \cos^2 A, \quad r' = b^2 \sin^2 A, \quad R = r + r', \quad K = r - r',$$

$$\tang A' = \sqrt{\frac{r'}{r}} = \tang A \cos(i + r) : \cos(i - r);$$

$$t = (1 - a^2)\cos^2 A, \quad t' = (1 - b^2)\sin^2 A, \quad T = t + t', \quad K = t' - t$$

$$\text{et} \quad \tang A_{,}' = \sqrt{\frac{r'}{t}} = \tang A : \cos(i - r).$$

1569. *Polarisation des anneaux colorés formés par les lames minces.* M. Arago a observé dans la lumière des anneaux colorés plusieurs phénomènes, dont un surtout est fort remarquable, et qui s'expliquent avec un grande facilité dans le système des ondulations. Voici en quoi ils consistent : lorsqu'on observe les anneaux réfléchis à travers un prisme biréfringent achromatique, placé de manière que sa section principale soit parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion, sous l'incidence perpendiculaire, on aperçoit deux images de même intensité ; par conséquent la lumière des anneaux n'est pas polarisée ; mais si l'inclinaison augmente, une des deux images s'affaiblit, disparaît sous l'angle de polarisation complète du verre, et reparaît au delà avec une intensité croissante à mesure que les rayons réfléchis s'inclinent davantage. L'image qui éprouve ces variations est l'image extraordinaire quand la section principale du prisme est parallèle au plan de réflexion ; c'est l'image ordinaire dans le cas contraire. Dans toutes les inclinaisons du rayon incident, les teintes des deux images sont les mêmes ; elles ne diffèrent que par l'intensité. Ainsi la lumière des anneaux colorés est en partie polarisée dans le plan d'incidence, et la quantité de lumière polarisée augmente jusqu'à ce que l'angle de réflexion soit celui de la polarisation complète sur le verre, et diminue au delà.

Les mêmes phénomènes se développent lorsque les anneaux se forment entre une lentille et un miroir métallique, mais avec cette différence caractéristique, que l'image qui reparaît au delà de l'incidence de 35° présente des teintes complémentaires de celle qui n'a pas disparu.

Lorsqu'on observe avec un prisme biréfringent les anneaux transmis à travers un système de deux lentilles éclairées par une large feuille de papier, en arrêtant par un écran les rayons qui pourraient produire des anneaux par réflexion, on aperçoit deux images qui éprouvent, par les changements d'inclinaison, les mêmes variations que les anneaux réfléchis : par conséquent, la lumière est polarisée de la même manière. Le prisme biréfringent n'agit que sur la lumière même des anneaux, car un objet placé sur le papier donne toujours deux images de même intensité.

Si on observe directement les anneaux réfléchis formés entre un verre et un prisme biréfringent, le verre étant placé en dessus, les anneaux ne diffèrent en rien de ceux qui se forment entre deux lames de verre ; mais si la plaque cristallisée est placée en dessus, on voit deux systèmes d'anneaux ; et si l'angle d'incidence est de 35°, en faisant tourner le système des deux plaques, pour chaque tour complet, l'image disparaît deux fois. Lorsqu'avec le même appareil on observe les anneaux transmis, les images ne changent pas d'intensité quand la lumière traverse d'abord la plaque de verre ; dans le cas contraire, les anneaux varient d'intensité comme les anneaux réfléchis.

De tous ces faits, deux seulement exigent une explication particulière : ce sont 1° le parallélisme des plans de polarisation des anneaux réfléchis et transmis, et la tendance vers une polarisation opposée sous une incidence qui excède celle de la polarisation complète ; 2° le changement qu'éprouve un des deux systèmes d'anneaux à travers un prisme biréfringent, au delà de l'angle de la polarisation complète, lorsque la plaque inférieure est métallique.

Pour rendre compte du premier, il faut considérer la lumière incidente comme composée de deux faisceaux d'égale intensité, polarisés, l'un dans le plan de réflexion, l'autre dans un

Digitized by Google

plan perpendiculaire, et calculer les intensités des rayons réfléchis à la seconde surface de la lame mince, et de ceux qui sortent après deux réflexions intérieures, en tenant compte des quantités de lumière perdue à toutes les réflexions et les réfractions qu'ils ont éprouvées. Ces intensités étant précisément celles des anneaux polarisés dans le plan de réflexion et dans un plan perpendiculaire, celui qui aura la plus grande intensité déterminera le sens de la polarisation des deux systèmes superposés. En désignant par r^2 et r'^2 les intensités des rayons réfléchis, pour les rayons incidents polarisés dans le plan d'incidence et dans un plan perpendiculaire, et dont l'intensité est 1, on trouve que les rayons réfléchis à la seconde surface de la lame mince ont pour intensités $r^2(1-r^2)^4$ et $r'^2(1-r'^2)^4$, et que celles des rayons qui sortent après deux réflexions sont $r^4(1-r^2)^6$ et $r'^4(1-r'^2)^6$. Si on remplace r^2 et r'^2 par leurs valeurs $\sin^2(i-r):\sin^2(i+r)$ et $\tang^2(i-r):\tang^2(i+r)$, on trouve que les rayons polarisés dans le plan d'incidence ont une plus grande intensité que les autres.

Quant au fait observé lorsque la plaque inférieure est métallique, il se réduit évidemment à ceci : lorsque la lumière incidente est polarisée perpendiculairement au plan d'incidence, au delà de l'incidence correspondante à $i+r=90^\circ$, un des deux systèmes de rayons réfléchis qui interfèrent éprouve un retard d'une demi-longueur d'ondulation. Ce retard s'explique par la seule inspection de la formule qui représente la vitesse d'oscillation dans le rayon réfléchi. En effet, ces vitesses pour le rayon réfléchi à la première et à la seconde surface de la lame mince sont proportionnelles à

$$\frac{\tang(i-r)}{\tang(i+r)} \quad \text{et} \quad \frac{\tang(i-r')}{\tang(i+r')},$$

r et r' étant les angles de réfraction correspondants à l'angle d'incidence i dans la lame mince et dans le dernier milieu. Or, quand $i+r$ dépasse 90°, $\tang(i+r)$ change de signe, et comme il n'en est pas de même de $\tang(i+r')$, attendu que, le second milieu étant métallique, r' est beaucoup plus petit que r, et ce changement de signe correspondant, comme on sait, à une différence de chemin d'une demi-longueur d'ondulation. Cette explication, due à M. Ivory, a été vérifiée directement. Il résulte évidemment de ce que nous venons de dire que, si on formait des anneaux avec une lame d'air renfermée entre deux lames minces, dont la première aurait un indice plus petit que la seconde, pour les incidences comprises entre $i+r=90$, et $i+r'=90$, on devrait obtenir des anneaux à centre blanc lorsque la lumière incidente est polarisée dans un plan perpendiculaire au plan de réflexion ; et quand la lumière est naturelle, deux systèmes d'anneaux, l'un à centre noir, l'autre à centre blanc, superposés, et que l'on pourrait facilement séparer en les observant avec un prisme de chaux carbonatée. L'expérience a complétement confirmé ces conséquences de la théorie.

Le tableau suivant, calculé par M. Brewster, renferme les quantités de lumière réfléchie réfractées et polarisées, pour le verre dont l'indice de réfraction est 1,525 ; la quantité de lumière incidente naturelle est 1000, et les angles sont comptés à partir de la normale.

Digitized by Google

ANGLES D'INCIDENCE.	ANGLES de RÉFRACTION	AZIMUT DU PLAN DE POLARISATION		QUANTITÉ DE LUMIÈRE		
		LUMIÈRE RÉFLÉCHIE.	LUMIÈRE REFRACTÉE.	RÉFLÉCHIE.	TRANSMISE.	POLARISÉE.
0°0′	0°00′	45°00′	45°00′	43,23	956,77	0,00
2 0	1 18,7	44 57	45 00,7	43,26	956,74	0,07
10 0	6 32	43 51	45 03	43,39	956,61	1,73
20 0	12 58	40 15	45 13	43,41	956,59	7,22
25 0	16 05	37 21	45 21	43,64	956,36	11,06
30 0	19 08,5	33 40	45 31	44,78	954,22	17,24
35 0	22 06	29 08	45 44	46,33	953,67	24,40
40 0	24 56	23 41	46 00	49,10	950,90	32,20
45 0	27 37,5	17 22	46 20	53,66	946,33	44,00
50 0	30 00	10 18	46 45	61,36	938,64	57,40
56 45	33 15	0 00	47 29	79,50	920,50	79,50
60 0	34 36	5 04	47 54	93,31	906,69	91,60
65 0	36 28	12 45	48 42	124,86	875,14	112,70
70 0	38 02	18 32	49 28	162,67	837,33	129,80
75 0	39 18	26 32	50 35	257,56	742,44	152,30
78 0	39 54	30 44	51 48	329,95	670,05	157,60
78 7	39 55	30 53	51 50	333,20	666,80	157,65
79 0	40 04	31 59	52 07	359,27	640,73	157,60
80 4	40 13	33 13	52 27	391,70	608,30	156,70
82 4	40 35	36 22	53 26	499,44	500,56	145,40
84 0	40 42	38 02	53 57	560,32	439,68	134,93
85 0	40 47	39 12	54 22	616,28	383,72	127,70
85 30,7	40 50,7	40 12	54 44	666,44	333,56	111,11
86 0	40 51	40 22	54 48	676,26	323,74	108,67
87 0	40 54	41 32	55 16	744,11	255,89	89,80
88 0	40 57,5	42 23	55 43	819,90	180,10	65,90
89 0	40 58	43 51	56 14	904,81	95,19	36,30
90 0	40 58	45 00	56 29	1000,00	0,00	0,00

Double réfraction.

1569 *bis*. Dans le système des ondulations, la vitesse de propagation des ondes dépend nécessairement de l'élasticité de l'éther dans le milieu que traverse la lumière ; or, la vitesse de propagation n'étant pas la même dans les cristaux suivant toutes les directions, on a été conduit à admettre que dans ces corps l'élasticité de l'éther n'était pas la même dans tous les sens.

1570. Appliquons ces idées à la double réfraction, et concevons un cristal à un axe comme un milieu élastique dans lequel la force accélératrice qui résulte du déplacement d'une file de molécules perpendiculaires à l'axe, relativement aux rangées contiguës, est la même tout autour de l'axe ; tandis que les déplacements parallèles à l'axe produisent des forces accélératrices d'une intensité différente, plus forte si le cristal est répulsif, et plus faible s'il est attractif. Le caractère distinctif des rayons qui éprouvent la réfraction ordinaire étant de se propager avec la même vitesse suivant toutes les directions, il faudra admettre que les mouvements oscillatoires s'exécutent perpendiculairement au plan mené par ces rayons et l'axe du cristal : car alors les déplacements qu'ils occasionnent, s'effectuant toujours suivant des directions perpendiculaires à l'axe, développeront toujours la même force accélératrice. Mais,

Digitized by Google

d'après le sens qu'on attache à l'expression *plan de polarisation*, le plan dont nous venons de parler est précisément le plan de polarisation des rayons ordinaires. Ainsi, dans un faisceau polarisé, le mouvement oscillatoire s'exécute perpendiculairement à ce qu'on appelle plan de polarisation.

Les oscillations des rayons ordinaires étant perpendiculaires au plan mené par l'axe, les oscillations des rayons extraordinaires seront parallèles à ce plan, et bien entendu, toujours perpendiculaires aux rayons. On voit alors qu'à mesure qu'ils changeront d'inclinaison relativement à l'axe, la direction du mouvement oscillatoire en changera aussi : il sera parallèle à l'axe quand les rayons lui seront perpendiculaires, et perpendiculaire à l'axe quand les rayons lui seront parallèles ; ainsi, dans ce dernier cas, la vitesse de propagation des rayons extraordinaires sera la même que celle des rayons ordinaires. Mais pour toutes les autres directions, les petits dérangements des files de molécules ne s'exécutant plus perpendiculairement à l'axe, les forces accélératrices qui en résultent, et par suite la vitesse de propagation, ne peuvent plus être les mêmes. Cette différence augmente progressivement jusqu'à ce que le mouvement oscillatoire soit parallèle à l'axe ; c'est alors qu'elle atteint son maximum.

Considérons ce cas particulier pour simplifier les idées, et supposons qu'on expose perpendiculairement au rayon incident une plaque cristallisée parallèle à l'axe, en sorte que les rayons qui la traversent soient perpendiculaires à ce dernier ; supposons en outre que le faisceau incident soit polarisé suivant un plan déterminé, faisant un angle i avec la section principale du cristal : ses oscillations seront perpendiculaires à ce plan. Cela posé, on peut, en raison du principe de la composition et de la décomposition des petits mouvements, concevoir chacune des vitesses d'oscillation des ondes incidentes décomposée en deux autres, l'une perpendiculaire et l'autre parallèle à la section principale : les premières composantes produiront les ondes ordinaires, et les autres celles qui éprouvent la réfraction extraordinaire. Or, si l'on prend pour unité le facteur commun qui multiplie toutes les vitesses d'oscillation des diverses couches de l'onde qui entre dans le cristal, $\cos i$ sera le facteur commun des premières composantes ou leur intensité de vitesse absolue, et $\sin i$ celle des autres composantes, et les intensités de lumière des rayons ordinaires et extraordinaires seront entre elles comme $\cos^2 i$ est à $\sin^2 i$: voilà une explication bien simple de la loi de Malus. Les oscillations de ces deux systèmes d'ondes étant rectangulaires s'exécuteront dans le cristal d'une manière indépendante ; et, en raison de la différence d'énergie des forces accélératrices qui résultent des petits déplacements des molécules du milieu, parallèlement ou perpendiculairement à l'axe, les deux systèmes d'ondes se propageront avec des vitesses différentes, et la distance entre leurs points correspondants deviendra d'autant plus considérable qu'ils auront traversé une plus grande épaisseur du cristal.

Si c'est de la lumière directe qu'on fait tomber sur le cristal, on pourra appliquer aux divers systèmes d'ondes polarisés dont elle se compose ce que nous venons de dire pour un seul : chacun se divisera de la même manière en ondes ordinaires et ondes extraordinaires, dont les intensités seront en général différentes. Mais comme, en raison de la multitude des chances, il doit se trouver en somme autant de lumière polarisée suivant un plan quelconque que suivant le plan perpendiculaire ; les rayons ordinaires et extraordinaires auront la même intensité.

L'explication des phénomènes que présentent les cristaux à deux axes a conduit Fresnel à des considérations beaucoup plus générales, que nous allons exposer.

1571. Quand on déplace une molécule dans un milieu élastique, la résultante des forces qui tendent à la ramener à sa première position n'est pas généralement parallèle à la direc-

Digitized by Google

tion suivant laquelle elle a été déplacée. Il faut pour cela que les résultantes des forces qui poussent cette molécule de droite et de gauche dans chaque azimut aient la même intensité. Cette circonstance n'a généralement lieu que dans trois directions rectangulaires, qui portent le nom d'axes d'élasticité. Si nous supposons que les axes d'élasticité conservent la même direction dans toute l'étendue du milieu, ce qui aura lieu toutes les fois que les molécules seront disposées entre elles de la même manière, comme dans les corps cristallisés, en prenant sur chacun des trois axes, et dans toutes les directions possibles, des longueurs proportionnelles aux racines carrées des élasticités dans ces directions, on formera une surface connue sous le nom de *surface d'élasticité*, dont les rayons vecteurs représenteront les vitesses de propagation des mouvements parallèles à leurs directions.

Fresnel a démontré que la surface d'élasticité était représentée en coordonnées polaires par l'équation

$$V^2 = a^2 \cos^2 X + b^2 \cos^2 Y + c^2 \cos^2 Z.$$

a^2, b^2, c^2, étant les élasticités mises en jeu par les vibrations parallèles aux axes des x, des y et des z; de manière que les vitesses de propagation correspondantes, qui sont proportionnelles aux racines carrées des élasticités, se trouvent représentées par a, b, c. Cette équation, traduite en coordonnées rectangulaires, devient

$$(x^2 + y^2 + z^2)^2 = a^2x^2 + b^2y^2 + c^2z^2.$$

1572. Appliquons maintenant ces idées à la lumière. Admettons qu'elle se transmet à travers un corps par les vibrations de l'éther intermoléculaire; et que, dans un même corps cristallisé, l'élasticité de l'éther n'est pas la même dans toutes les directions. Désignons par les lignes rectangulaires OX, OY, OZ (*fig.* 928), les trois axes d'élasticité; a sera la vitesse avec laquelle les mouvements de l'éther parallèles à OX se propagent dans le plan YOZ, b et c seront les vitesses avec lesquelles des mouvements parallèles à OY et à OZ se propageraient dans les plans XOZ et XOY; et supposons que a soit plus grand que b, et que b soit plus grand que c, de sorte que b soit l'axe moyen d'élasticité. Considérons une onde plane passant par le point O, et dont toutes les molécules se meuvent simultanément dans une certaine direction; la direction du mouvement propagé dépendra à la fois de la position du plan de l'onde et de la direction du mouvement dans l'onde. Supposons d'abord que le plan de l'onde coïncide avec le plan YOZ, et que les mouvements de l'éther dans l'onde soient parallèles à l'axe OY, les mouvements se propageront parallèlement à OX en conservant leur direction avec une vitesse b. Si les mouvements étaient parallèles à OZ, le même effet aurait lieu, mais la vitesse de transmission serait c. Il résulte de là qu'une onde plane perpendiculaire à un des trois axes d'élasticité, et polarisée parallèlement ou perpendiculairement à un des autres axes, se propage sans se diviser et en conservant son plan de polarisation. Mais si, le plan de l'onde étant toujours perpendiculaire à l'axe OX, les mouvements de l'éther étaient obliques aux axes OY et OZ, ces petits mouvements pourraient se décomposer en deux autres parallèles à ces axes : ainsi le rayon se diviserait en deux autres, polarisés parallèlement aux axes OY et OZ, qui marcheraient dans la même direction mais avec des vitesses différentes.

1573. Supposons maintenant que le plan de l'onde ait une position quelconque par rapport aux axes d'élasticité : en général, chaque petit mouvement changera constamment de direction pendant toute la transmission, et il serait difficile d'en suivre la marche. Mais il y a un cas dans lequel ce changement de direction n'a pas lieu, c'est celui où les directions des mouvements primitifs et des premiers mouvements transmis sont dans un même plan, et que ce plan est perpendiculaire au plan de l'onde : car il est évident que, si ces directions n'étaient point parallèles, le défaut de parallélisme ne proviendrait que d'une force dirigée dans le sens de la transmission qui agirait inégalement pour comprimer l'éther, force qui ne peut avoir aucune influence dans les vibrations transversales. Mais on trouve, par le calcul, que la circonstance dont il est question existe toutes les fois que les mouvements de l'éther dans l'onde sont dirigés suivant le plus grand et le plus petit rayon vecteur de la surface d'élasti-

Digitized by Google

cité renfermés dans le plan de l'onde, rayons qui sont toujours perpendiculaires entre eux : par conséquent, si on décompose chacun des petits mouvements qui ont lieu dans le plan de l'onde en deux autres dirigés suivant ces deux rayons vecteurs, les mouvements de ces composantes se propageront en conservant leur parallélisme, mais avec des vitesses différentes, et, par suite, l'intervalle qui sépare deux points correspondants sera d'autant plus grand qu'ils auront parcouru une plus grande épaisseur du cristal. Les deux systèmes d'ondes produites se séparent d'ailleurs par l'inclinaison des surfaces des ondes qui les propagent : car les normales forment, avec la perpendiculaire à la surface d'incidence, des angles dont les sinus sont dans le rapport direct des vitesses de propagation des ondes, comme nous l'avons vu en parlant de la réfraction.

Ainsi, un faisceau de lumière naturelle ou polarisée se divisera toujours en deux faisceaux polarisés dans deux plans rectangulaires, parallèles chacun à un des axes de la section de la surface d'élasticité.

1574. En discutant l'équation de la surface d'élasticité, on trouve qu'elle peut toujours être coupée par deux plans diamétraux suivant deux cercles; ces plans passent par l'axe moyen, et sont symétriquement placés par rapport aux deux autres. En supposant que b soit l'axe moyen, les tangentes des angles de ces plans avec celui des axes a et b ont pour valeur

$$\pm\sqrt{\frac{a^2-b^2}{b^2-c^2}}.$$

Les ondes parallèles à ces plans ne pourront alors avoir qu'une seule vitesse de propagation, et les mouvements élémentaires, quelle que soit leur direction, ne pourront éprouver aucune déviation. Ainsi, les rayons qui pénétreront dans le corps perpendiculairement à ces plans diamétraux n'éprouveront ni double réfraction ni déviation dans leurs plans de polarisation : ces directions sont alors celles des axes optiques des cristaux à deux axes. Ainsi les axes optiques sont situés dans le plan des axes de plus grande et de plus petite élasticité, et également inclinés sur leurs directions. Quand deux des trois axes d'élasticité sont égaux, les sections circulaires se confondent et deviennent perpendiculaires au troisième axe : alors les deux axes optiques se réduisent à un seul.

D'après cela les axes optiques des cristaux sont les directions dans lesquelles des faisceaux de rayons parallèles ou des ondes planes se propagent sans éprouver de division ni de changement dans leurs plans de polarisation.

Il est bien important de remarquer qu'il est question d'un large faisceau de lumière correspondant à une onde plane, et non pas d'un rayon de lumière correspondant à un élément d'onde, car les phénomènes qui se produisent dans les deux cas sont souvent très-différents. En effet, lorsqu'une onde plane se propage en conservant sa direction, la direction de propagation du mouvement est toujours perpendiculaire à la direction de l'onde, attendu que les actions exercées par les molécules d'éther, d'une onde, sur celles qui sont au delà, sont toujours symétriques de part et d'autre du plan mené par la direction du mouvement perpendiculairement au plan de l'onde. Mais il n'en est plus ainsi quand il ne s'agit que d'un élément d'onde, d'un rayon : la propagation peut avoir lieu suivant des directions plus ou moins inclinées au plan de l'élément.

Nous allons voir d'ailleurs de nombreuses confirmations de la distinction que nous venons d'établir.

1575. Les quantités a, b, c, représentant les vitesses de propagation de la lumière perpendiculairement aux trois axes d'élasticité, sont en raison inverse des indices qu'on obtiendrait en taillant dans un cristal trois prismes dont les arêtes de chacun seraient parallèles à un des axes, et observant dans un plan perpendiculaire aux arêtes l'indice du rayon qui suit la loi de Descartes; il y en a toujours un qui satisfait à cette condition : car la lumière incidente devra se diviser en deux faisceaux polarisés l'un parallèlement, l'autre perpendiculairement aux arêtes parallèles du prisme; mais dans ce dernier, les mouvements vibratoires étant parallèles à un des axes, la vitesse de transmission devient indépendante de l'angle d'incidence, et par conséquent la loi de Descartes subsiste.

Digitized by Google

Dans un grand nombre de cas les phénomènes de coloration décrits (1464) permettent facilement de déterminer la position des axes optiques, et par suite celle des axes d'élasticité. M. Rudberg a fait ces expériences pour la topaze incolore et l'aragonite, en employant successivement les rayons colorés correspondants aux raies *B, C, D, E, F, G, H*. Voici les résultats obtenus :

Raies.	$\frac{1}{a}$	$\frac{1}{b}$	$\frac{1}{c}$
		Aragonite.	
B.	1,52749	1,67631	1,68061
C.	1,52820	1,67779	1,68203
D.	1,53013	1,68157	1,68589
E.	1,53264	1,68634	1,69084
F.	1,53479	1,69053	1,69515
G.	1,53882	1,69836	1,70318
H.	1,54226	1,70509	1,71011
		Topaze incolore.	
B.	1,60840	1,61049	1,61791
C.	1,60935	1,61144	1,61880
D.	1,61161	1,61375	1,62109
E.	1,61462	1,61668	1,62408
F.	1,61701	1,61914	1,62652
G.	1,62154	1,62365	1,63123
H.	1,62539	1,62745	1,63506

1576. Examinons maintenant comment les surfaces des ondes transmises pourront être déterminées. Considérons un faisceau de rayons parallèles à l'instant où l'onde PI arrive à la surface MN d'un milieu cristallisé (*fig.* 928, *A*) : le rayon LI pénètrera d'abord, et successivement tous les autres, et tous parcourront des directions parallèles. Supposons que Q représente la position du petit mouvement apporté par le rayon LI après l'unité de temps : si nous supposons que IR représente la vitesse de la lumière dans le premier milieu, en prenant le point S de manière que $PS = RI$, le mouvement qui était au point P quand celui en I a pénétré dans le cristal sera en S, et celui qui était en T est arrivé en un point X tel, que $UX : IQ :: SP : TU$. Ainsi les points S, X et Q, sont en ligne droite : donc tous les mouvements qui existaient dans l'onde PI se trouvent après l'unité de temps sur la ligne SQ; et, comme il en sera de même de tous les plans de rayons parallèles à la figure que pour tous, les points correspondants à S seront sur une ligne tracée sur la surface du cristal perpendiculaire au plan d'incidence, il s'ensuit que les plans des ondes transmises après l'unité de temps passent par la ligne $S'S''$, et sont perpendiculaires au plan d'incidence. Alors, pour déterminer leurs directions, il faudra par le point I et dans le plan d'incidence (*fig.* 928 *B*) tracer deux cercles ayant pour rayons, l'un le plus grand, l'autre le plus petit rayon vecteur de la surface d'élasticité, renfermés dans le plan de l'onde incidente; prendre $IR = 1$, $SP = 1$, ou $IS = 1 : \sin i$, et par le point S mener les tangentes aux cercles : les plans élevés par ces lignes perpendiculairement au plan d'incidence seront les plans cherchés.

Les deux plans de polarisation seront évidemment perpendiculaires aux axes de la section diamétrale de la section de la surface d'élasticité. Fresnel a démontré que chacun de ces plans divise en deux parties égales les angles dièdres formés par les deux plans menés suivant la normale à l'onde et les deux normales aux plans des sections circulaires de la surface d'élasticité.

1577. *Surface des ondes.* Si on conçoit une onde plane passant par le point O (*fig.* 928), dans laquelle les mouvements se propagent parallèlement, après le temps t elle atteindra une certaine position; et si on conçoit que des ondes planes, ayant toutes les directions possibles autour du point O, partent simultanément, après le temps t elles seront toutes tangentes à

Digitized by Google

une certaine surface, qui sera la surface de l'onde provenant du rayonnement du point O dans toutes les directions. Fresnel a trouvé, pour la surface de l'onde, l'équation suivante :

$$(x^2+y^2+z^2)(a^2x^2+b^2y^2+c^2z^2)-(b^2+c^2)a^2x^2$$
$$-(a^2+c^2)b^2y^2-(a^2+b^2)c^2z^2+a^2b^2c^2=0. \qquad (a)$$

1578. Fresnel a aussi reconnu, par un calcul très-simple, que, si on construit un ellipsoïde sur les trois axes d'élasticité, et si on mène par le centre un plan sécant quelconque et une normale à ce plan, en prenant sur cette normale, à partir du centre de l'ellipsoïde, deux longueurs égales aux axes de l'ellipse, ces points se trouvent sur la surface de l'onde.

1579. Supposons que les valeurs de a, b, c, qui représentent les vitesses de propagation parallèlement aux trois axes d'élasticité, soient connues en nombres pour les différents rayons colorés, en prenant pour unité la vitesse de propagation de la lumière dans le vide, qu'on construise la surface représentée par l'équation (a), en prenant une certaine longueur pour représenter l'unité de vitesse, et pour centre un point de la surface du cristal biréfringent : lorsqu'on connaîtra la direction d'un rayon incident, il sera facile de trouver la direction du rayon transmis, car il suffira de mener à la surface de l'onde un plan tangent, par une ligne de la surface d'incidence déterminée comme pour les ondes planes et la surface d'élasticité (1576). Le point de contact appartiendra au rayon transmis, et la vitesse de propagation sera représentée par le rayon vecteur dirigé suivant le rayon réfracté. L'équation (a) étant du quatrième degré, on peut en général, par une droite extérieure, mener quatre plans tangents à la surface qu'elle représente; mais il est facile de voir, d'après la disposition de cette surface, que deux d'entre eux iront toucher la surface au-dessus du plan d'incidence, et seront étrangers à la question.

Quant aux directions des plans de polarisation, on pourrait les déterminer de la même manière que pour les ondes planes indéfinies, au moyen de la surface d'élasticité ; ou bien, en projetant le rayon vecteur de l'onde sur le plan tangent à son extrémité, le plan projetant est le plan de polarisation du rayon : car la direction des mouvements de l'éther restant toujours la même, la déviation du rayon n'a pu avoir lieu que perpendiculairement à ces mouvements, et par conséquent le plan perpendiculaire à l'élément de l'onde passant par le rayon est perpendiculaire aux mouvements élémentaires. On pourrait aussi employer la loi approchée suivante, due à M. Biot : Si on mène un plan par chacun des rayons et chacun des axes optiques, le plan de polarisation d'un des rayons divisera l'angle dièdre en deux parties égales, l'autre sera perpendiculaire à ce plan intermédiaire.

Il résulte de la construction que nous venons de décrire que les petits mouvements élémentaires ne sont plus perpendiculaires aux rayons, comme dans la transmission à travers un milieu homogène, car les rayons vecteurs ne sont pas perpendiculaires aux plans tangents à leurs extrémités.

Tout cela suppose qu'il s'agisse d'un rayon lumineux. S'il s'agissait d'un large faisceau correspondant à une onde plane d'une étendue finie, le plan tangent serait la position de l'onde, la vitesse serait représentée par la perpendiculaire abaissée du centre de la surface sur le plan tangent, et la direction du mouvement vibratoire serait parallèles aux axes de la section de la surface d'élasticité par le plan de l'onde incidente.

1580. Fresnel a démontré que, dans les cristaux à deux axes, les vitesses V et V' des rayons qui traversent le cristal dans une direction commune, faisant avec les deux axes optiques des angles A et A', sont données par les équations

$$\frac{1}{V^2}=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{a^2}+\frac{1}{c^2}\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{a^2}-\frac{1}{c^2}\right)\cos(A+A'),$$

$$\frac{1}{V'^2}=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{a^2}+\frac{1}{c^2}\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{a^2}-\frac{1}{c^2}\right)\cos(A-A'),$$

équations qu'on peut mettre sous la forme

Digitized by Google

$$\frac{1}{V^2} = \frac{1}{c^2} + \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{c^2}\right) \sin^2 \frac{1}{2}(A + A')\ldots \tag{1}$$

$$\frac{1}{V'^2} = \frac{1}{c^2} + \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{c^2}\right) \sin^2 \frac{1}{2}(A - A')\ldots \tag{2}$$

Dans les cristaux à un axe $A = A'$, et les deux formules deviennent

$$V'^2 = c^2 \quad \text{et} \quad \frac{1}{V^2} = \frac{1}{c^2} + \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{c^2}\right) \sin^2 A.$$

En retranchant l'équation (2) de l'équation (1), et remplaçant $2 \sin \frac{1}{2} A \cos \frac{1}{2} A'$ et $2 \sin \frac{1}{2} A' \cos \frac{1}{2} A'$, par $\sin A$ et $\sin A'$, il vient

$$\frac{1}{V^2} - \frac{1}{V'^2} = \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{c^2}\right) \sin A \sin A'. \tag{3}$$

Il faut bien remarquer que, dans toutes les formules précédentes, b est l'axe moyen d'élasticité, et par conséquent que, si on supposait $a = c$, il s'ensuivrait nécessairement que les trois axes seraient égaux.

Ces formules ont été obtenues au moyen de l'ellipsoïde construit sur les axes d'élasticité (1578). Les vitesses des rayons propagés suivant les mêmes directions étaient proportionnelles aux axes de la section de la surface par le plan perpendiculaire à la direction commune des deux rayons ; mais, comme dans cette surface les normales des sections circulaires ne coïncident pas avec les normales des sections circulaires de la surface d'élasticité, les angles A et A' ne sont pas relatifs aux axes optiques comme nous les avons définis ; ils sont relatifs à deux autres lignes, qui en diffèrent, mais très-peu, car les tangentes trigonométriques des angles que les normales aux sections circulaires de l'ellipsoïde et de la surface d'élasticité font avec l'axe de plus grande élasticité sont entre elles : : a : c, quantités qui, dans tous les cristaux connus, diffèrent très-peu l'une de l'autre.

Il faut bien remarquer, en outre, que ces formules de Fresnel sont relatives aux rayons qui suivent la même direction, et non pas aux deux rayons conjugués qui proviennent d'un même rayon incident, excepté quand il s'agit des cristaux à un axe, attendu qu'alors, une des nappes de la surface de l'onde devenant sphérique, les formules sont applicables aux rayons ordinaires et extraordinaires qui s'accompagnent ; mais, comme les deux rayons conjugués sont très-peu écartés, et que la courbure des nappes varie peu, en général, ces formules peuvent être appliquées aux rayons qui s'accompagnent.

La formule (3) a été donnée par M. Biot et M. Brewster, comme résultat de l'expérience, longtemps avant que Fresnel ait fait connaître la théorie générale de la double réfraction ; mais $1 : V^2$ et $1 : V'^2$ étaient remplacés par V^2 et V'^2, parce que, dans le système de l'émission alors adopté, la vitesse de la lumière est la vitesse renversée dans le système des ondulations ; en outre, la formule était relative aux vitesses des deux rayons conjugués.

1581. ***Discussion de l'équation de la surface de l'onde.*** **Supposons que deux des trois axes d'élasticité deviennent égaux, par exemple que $c = b$, la formule (a) devient**

$$(x^2 + y^2 + z^2 - b^2)(a^2 x^2 + b^2 y^2 + b^2 z^2 - a^2 b^2) = 0,$$

qui se décompose en deux autres :

$$x^2 + y^2 + z^2 - b^2 = 0 \quad \text{et} \quad a^2 x^2 + b^2 y^2 + b^2 z^2 - a^2 b^2 = 0.$$

La première représente une sphère dont le rayon est b, la seconde un ellipsoïde de révolution dont le rayon de l'équateur est b. a et b étant les vitesses des rayons extraordinaires et ordi-

Digitized by Google

naires, $\frac{1}{a}$ et $\frac{1}{b}$ sont les indices correspondants : on retrouve ainsi la construction d'Huyghens donnée (1412).

1582. Revenons maintenant au cas général dans lequel les vitesses a, b, c, sont toutes différentes, et déterminons les sections de la surface d'élasticité par les trois plans coordonnés : on trouve

$$x = 0, \quad (y^2 + z^2 - a^2)\,(b^2y^2 + c^2z^2 - b^2c^2) = 0;$$
$$y = 0, \quad (z^2 + x^2 - b^2)\,(c^2z^2 + a^2x^2 - a^2c^2) = 0;$$
$$z = 0, \quad (x^2 + y^2 - c^2)\,(a^2x^2 + b^2y^2 - a^2b^2) = 0.$$

Ainsi les traces sont composées d'un cercle et d'une ellipse; d'après l'hypothèse admise pour les valeurs relatives de a, b et c, les figures 729, 730, 731, représentent les trois intersections de la surface par les plans YZ, XZ et XY.

Dans la première et la troisième une des courbes est extérieure à l'autre, dans la deuxième elles se coupent aux points a, b, c, d; et il est facile de voir, d'après ce que nous avons dit précédemment, que les lignes qui joignent ces points d'intersection diffèrent des axes optiques.

Considérons d'abord le cas où le rayon incident est perpendiculaire à la surface du cristal, les axes du cristal ayant une position quelconque par rapport à sa surface. Pour obtenir les directions des rayons transmis il faudra construire la surface de l'onde, et lui mener un plan tangent parallèle à la surface du cristal. Il est facile de voir que, quand les axes d'élasticité seront parallèles ou perpendiculaires à la surface d'incidence, il y aura toujours deux plans tangents, mais les points de tangence seront toujours situés sur la normale à la surface du cristal au point d'incidence : ainsi les rayons transmis suivront la même direction, mais avec des vitesses différentes. Dans le cas où le rayon incident serait complétement polarisé dans un plan perpendiculaire à un des axes, il est évident que l'intensité d'un des deux rayons transmis deviendrait nulle : alors il n'y aurait qu'un seul rayon réfracté dont le plan de polarisation serait le même que celui du rayon incident. Si, au lieu d'un rayon très-délié, on avait une onde plane incidente, les ondes réfractées resteraient évidemment parallèles.

Mais, si la surface du cristal n'est perpendiculaire à aucun des trois axes, il y aura toujours deux plans tangents distincts, et par conséquent le rayon incident se divisera en deux autres qui suivront des routes différentes et plus ou moins écartées de la normale.

1583. En cherchant les directions dans lesquelles les deux vitesses deviennent égales, on trouve que ces directions coïncident avec les diagonales qui joignent deux à deux les quatre points d'intersection du cercle et de l'ellipse dans la section de la surface de l'onde par le plan perpendiculaire à l'axe moyen (*fig.* 930). Ces lignes ne coïncident pas avec les normales aux sections circulaires de la surface d'élasticité, c'est-à-dire avec les axes optiques, mais ils en sont très-voisins : la tangente de l'angle qu'ils forment avec l'axe de plus grande élasticité est

$$\frac{a\sqrt{b^2 - c^2}}{c\sqrt{a^2 - b^2}}.$$

1584. En discutant l'équation de la surface des ondes, M. Hamilton a reconnu que, dans les deux directions où les deux plans tangents se réduisaient à un seul, les points de tangence étaient en nombre infini, et distribués suivant une petite courbe fermée, sensiblement circulaire : les plans qui jouissent de cette propriété passent par les tangentes communes au cercle et à l'ellipse résultant de l'intersection de la surface par un plan perpendiculaire à l'axe moyen, et sont perpendiculaires à ce plan; ces quatre tangentes communes sont parallèles deux à deux, et perpendiculaires aux axes optiques (normales aux sections circulaires de la surface d'élasticité). Il résulte de là que, si un cristal était taillé parallèlement à deux de ces plans tangents communs, et s'il recevait un rayon incident normal, le rayon réfracté serait déterminé par le point de contact avec la surface d'élasticité d'un plan tangent parallèle à la surface d'entrée; mais, comme alors il y aurait une infinité de points de contact, le rayon réfracté formerait un cône creux, et

Digitized by Google

ces rayons, à l'émergence, devant reprendre la direction primitive, devraient former un cylindre creux ayant un diamètre constant. Cette conséquence si remarquable de la théorie de Fresnel a été vérifiée par M. Lloyd.

Avant d'exposer les détails des expériences, remarquons d'abord qu'il n'est pas nécessaire que le cristal soit taillé comme nous l'avons indiqué ; il suffit que le rayon traverse le cristal dans la direction d'un des axes optiques, car alors le plan tangent qui déterminera sa position dans la surface de l'onde devra être tangent aux deux nappes. M. Lloyd a employé un cristal d'aragonite, taillé perpendiculairement à la ligne moyenne ; la lumière partait d'une lampe placée à distance, et, pour réduire autant que possible la largeur du faisceau, il le faisait passer à travers deux petites ouvertures, l'une pratiquée dans un écran placé près de la flamme, la seconde dans une plaque mince de métal placée sur la première face du cristal. Dans les circonstances ordinaires, en observant avec une lentille, on voyait deux images ; mais, en faisant varier progressivement l'incidence, les deux images se confondaient et on apercevait un anneau brillant. M. Lloyd, en employant de la lumière solaire, s'est assuré que son diamètre ne changeait pas avec la distance.

1585. M. Hamilton a encore remarqué dans la surface de l'onde une circonstance fort importante : les intersections du cercle et de l'ellipse (*fig.* 930) sont des ombilics, c'est-à-dire qu'en ces points la surface a la forme d'un cône évasé, et par conséquent qu'il y a une infinité de plans tangents qui passent par ces points. Il résulte de là qu'un faisceau incident formant un cône creux pourra donner un seul rayon réfracté dirigé suivant sa ligne ombilicale ; les plans d'incidence de ces rayons seront perpendiculaires aux intersections des plans tangents à l'ombilic avec la surface d'incidence, et les distances de ces lignes au point d'incidence représenteront 1 : sin i, i étant l'angle d'incidence ; et réciproquement le rayon réfracté émergera en un cône creux, car il doit être disposé de la même manière relativement aux deux surfaces. Pour vérifier cette conséquence de la théorie, M. Lloyd a placé une lentille à court foyer à sa distance focale de la première surface de la plaque d'aragonite, de manière que la partie centrale du faisceau se réfracte sensiblement suivant la ligne ombilicale ; une plaque mince de métal, percée d'un petit orifice, fut placée sur la surface du cristal voisine de l'œil. Lorsque l'ajustement était exact, on voyait un cercle lumineux avec un petit espace obscur au centre, et dans cet espace central obscur deux points brillants séparés par une ligne étroite et bien définie ; quand l'ouverture de la plaque était légèrement déplacée, le phénomène changeait rapidement, l'anneau blanc se réduisait à une petite fraction de son étendue. En opérant avec des rayons solaires, on reconnut que la section du cône émergent augmentait avec la distance.

1586. Il résulte de ce qui précède que dans les cristaux à deux axes, il n'existe aucune direction du rayon incident qui ne donne qu'un seul rayon transmis : car, pour qu'il en fût ainsi, il faudrait que les deux nappes de la surface des ondes fussent tangentes à certains points, afin que par ces points on pût leur mener un plan tangent commun, et cette circonstance n'existe pas ; il n'y a que dans le cas où, la surface étant parallèle à deux des axes d'élasticité, le rayon incident est normal et polarisé dans un plan passant par un des axes, que le rayon traverse le cristal sans déviation ni division.

Ainsi les axes optiques, définis comme nous l'avons fait pour les ondes planes, ne jouissent plus des mêmes propriétés pour des rayons isolés. Quelques physiciens regardent les lignes ombilicales comme les véritables axes obliques, qu'ils définissent par la propriété d'être parcourus avec la même vitesse par des rayons polarisés dans une direction quelconque.

Au reste, ces deux systèmes de lignes diffèrent très-peu dans les cristaux connus, car les tangentes des angles qu'ils forment avec l'axe de plus grande élasticité sont dans le rapport de $c : a$; or, dans la topaze $c : a = 0,9959$, et, dans la chaux sulfatée anhydre, l'un des cristaux à deux axes, dont la double réfraction est la plus énergique, $c : a = 0,9725$.

Coloration de la lumière polarisée par les lames minces cristallisées.

1587. Ce phénomène, que nous avons décrit avec beaucoup de détails (1433), s'explique dans le système des ondulations avec une admirable précision. Avant d'en-

Digitized by Google

trer dans les détails de cette explication, nous donnerons un aperçu des principes sur lesquels elle repose.

1588. Considérons un faisceau de lumière polarisée, traversant perpendiculairement une plaque cristallisée d'une épaisseur convenable, que nous supposerons d'abord à un axe : le faisceau se divisera en deux parties, l'une traversera le cristal avec la vitesse ordinaire, l'autre avec la vitesse extraordinaire, et les ondes planes réfractées resteront parallèles à l'onde incidente. Ces deux systèmes d'ondes parallèles étaient d'accord à leur entrée dans la lame, puisqu'ils proviennent de la division d'un même système d'ondes ; mais, à cause de l'inégalité de vitesse, ils ne seront plus d'accord à la sortie, de sorte qu'en reprenant dans l'air la même longueur d'ondulation, celui qui a marché le plus vite se trouvera en avance sur l'autre d'une certaine quantité. Alors, si les ondes pouvaient interférer, l'intensité du système d'ondes résultant varierait avec l'avance d'un des deux systèmes sur l'autre, et comme la différence de marche doit être estimée en fonction de la longueur d'ondulation dans l'air, les rayons de différentes teintes éprouveraient des variations d'intensité qui ne seraient point proportionnelles, et par conséquent la lumière serait colorée. Mais les deux systèmes d'ondes sont polarisés dans deux plans rectangulaires, et l'interférence ne peut rien changer, car alors, quelle que soit la différence de marche, l'intensité de l'onde résultante est égale à la somme des intensités des ondes composantes. Mais si les deux faisceaux émergents étaient ramenés à un même plan de polarisation, ils pourraient interférer, et les couleurs se développeraient.

Nous allons maintenant entrer dans tous les détails nécessaires.

1589. Soient PP' (*fig.* 952) le plan primitif de polarisation, OO' la section principale du cristal, i l'angle qu'elle forme avec le plan PP', SS' la section principale du rhomboïde, s l'angle qu'elle forme avec le plan primitif, λ la longueur d'ondulation, et F l'intensité de vitesse des molécules de l'éther dans leurs oscillations. D'après la loi de Malus, les faisceaux polarisés suivant CO et CE auront pour intensité

$$\cos i\, F_o \quad \text{et} \quad \sin i\, F_e .$$

Les petites lettres o et e placées au bas de F ne changent rien à la valeur de cette quantité : elles indiquent seulement la longueur des chemins parcourus au même instant par les rayons ordinaires et extraordinaires, après qu'ils sont sortis de la lame cristallisée, et déterminent ainsi, par leur différence $o - e$, l'intervalle qui sépare les points correspondants des deux systèmes d'ondes.

Chacun de ces faisceaux se divise en deux autres en traversant le rhomboïde, et il en résulte les quatre faisceaux dont les valeurs sont

$\cos i \cos (i - s)\, F_{o+o'}$	$\cos i \sin (i - s)\, F_{o+e'}$
$\sin i \sin (i - s)\, F_{e+o'}$	$\sin i \cos (i - s)\, F_{e+e'}$

Les deux premiers forment l'image ordinaire, et les deux derniers l'image extraordinaire. Mais les deux derniers faisceaux doivent nécessairement avoir des vitesses de signes contraires, indépendamment de la différence des chemins parcourus : car, à l'inspection seule de la figure, on voit que les mouvements oscillatoires perpendiculaires à CO et à CE donneront lieu à de petits mouvements perpendiculaires à CS, qui seront dirigés dans le même sens, tandis que ces mêmes mouvements donneront naissance à des mouvements perpendiculaires à CT, qui seront dirigés en sens contraire ; et il est facile de voir que l'image dont l'intensité dépend non-seulement de la différence des chemins parcourus, mais encore d'une différence d'une demi-ondulation dans les deux faisceaux constituants, est celle dont les deux faisceaux ont eu des plans de polarisation

Digitized by Google

qui se sont toujours écartés ou rapprochés jusqu'à ce qu'ils se soient confondus; et que l'image dans laquelle l'intensité ne résulte que des différences de chemins est celle dont les faisceaux constituants ont eu des plans de polarisation qui ont éprouvé successivement deux mouvements contraires avant de se confondre.

Les vitesses d'oscillation dans l'image extraordinaire sont alors

$$F \cos i \sin (i - s) \quad \text{et} \quad -F \sin i \cos (i - s).$$

En appliquant ici la formule générale (1526)

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2aa' \cos 2\pi \left(\frac{c}{\lambda}\right),$$

dans laquelle a et a' représentent les vitesses d'oscillation des deux systèmes d'ondes, c la différence des chemins parcourus, et λ la longueur d'ondulation, on trouve, pour l'intensité de la lumière homogène dans l'image extraordinaire, en supprimant le facteur F, qu'on peut prendre pour unité,

$$\cos^2 i \sin^2 (i - s) + \sin^2 i \cos^2 (i - s) - 2\sin i \cos i \sin(i - s) \cos(i - s) \cos 2\pi \left(\frac{o - e}{\lambda}\right),$$

ou

$$[\sin i \cos (i - s) - \cos i \sin (i - s)]^2 + 2\sin i \cos i \sin (i - s) \cos (i - s) \left[1 - \cos 2\pi \left(\frac{o - e}{\lambda}\right)\right],$$

ou enfin

$$\sin^2 s + \sin 2i \sin 2(i - s) \sin^2 \pi \left(\frac{o - e}{\lambda}\right) \ldots \qquad (a)$$

En faisant un calcul semblable sur les deux faisceaux constituant l'image ordinaire, et observant que les vitesses des deux rayons sont dirigées dans le même sens, on trouve pour l'intensité de cette image

$$\cos^2 s - \sin 2i \sin 2(i - s) \sin^2 \pi \left(\frac{o - e}{\lambda}\right) \ldots \qquad (b)$$

Telles sont les formules générales qui donnent l'intensité de chaque rayon homogène dans les images ordinaires et extraordinaires, en fonction de la longueur d'ondulation et de la différence des chemins $o - e$, parcourus par les rayons qui ont traversé la lame cristallisée, estimée en longueur d'ondulation. Quand on connaîtra l'épaisseur de la lame et les vitesses des rayons ordinaires et extraordinaires, il sera facile de déterminer $o - e$. Comme, dans la plupart des cristaux qui possèdent la double réfraction, $o - e$ n'éprouve que de très-légères variations en raison de la différence de teinte des rayons lumineux, on pourra regarder cette quantité comme constante; alors, si, après avoir calculé sa valeur, on la divise successivement par les longueurs d'ondulation des sept principales couleurs, les formules (a) et (b) donneront les intensités de la lumière dans les deux images.

1590. Il résulte de ces formules plusieurs conséquences remarquables.

1° Les intensités des deux images sont complémentaires, car leur somme est égale à l'unité, intensité du rayon incident; d'où il suit que, si la lumière incidente était blanche, le lieu où les images se superposeraient serait blanc, parce que les intensités des images de différentes teintes se trouveraient exactement dans les mêmes rapports que dans la lumière incidente. La perte de lumière par la réflexion à la première et à la seconde surface du cristal n'apporterait aucune modification, car les rayons resteraient toujours dans les mêmes proportions relatives, puisque la lumière blanche n'est pas colorée par la réflexion ou la réfraction à travers les lames à faces parallèles dont nous nous occupons.

2° Les images deviendront évidemment blanches quand le second terme sera nul : on a par conséquent, pour cette circonstance, la condition

Digitized by Google

$$\sin 2i \sin 2(i - s) = 0,$$

qui peut être satisfaite, indépendamment de s, par $\sin 2i = 0$, d'où $i = 0$, $i = 90^\circ$; et par $\sin 2(i - s) = 0$, d'où $2i - 2s = 0$, $2i - 2s = \pm 180^\circ$, et $s = i$, $s = 90^\circ + i$. Ainsi les images sont toujours blanches quand la section principale de la lame mince est parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, et, lorsque i est quelconque, elle est parallèle ou perpendiculaire à la section principale du rhomboïde : c'est ce qui est d'ailleurs évident, car alors les images ordinaires et extraordinaires ne renferment chacune qu'un seul rayon qui a traversé ordinairement ou extraordinairement la lame mince. Mais, dans le premier cas, une des deux images disparaît pour $s = 0$ ou $s = 90^\circ$, tandis que dans le second les deux images sont toujours visibles.

3° Le maximum d'éclat des deux images a lieu quand le coëfficient du second terme est le plus grand possible ; quand i est constant et quelconque, ce maximum a lieu pour les valeurs de s qui donnent

$$2i - 2s = 90^\circ, \quad \text{ou} \quad 2s - 2i = 90^\circ, \quad 2s - 2i = 270^\circ;$$

d'où

$$s = i + 45^\circ, \quad s = i + 135^\circ.$$

Mais le plus grand maximum d'éclat aura lieu quand $\sin 2i \sin 2(i - s)$ sera égal à l'unité; ce qui arrivera quand

$$i = 45^\circ \quad \text{et} \quad s = 0, \quad \text{ou} \quad s = 90^\circ.$$

4° Dans la lumière blanche, et quand i est constant, la teinte de chaque image reste constante pour une même épaisseur du même cristal, dans l'intervalle angulaire correspondant à deux images blanches. En effet, l'intensité de chaque image élémentaire est composée de deux parties : l'une est constante, quelle que soit la couleur du rayon, et par conséquent donnera de la lumière blanche ; l'autre varie avec la nature des rayons. Mais, le facteur variable étant indépendant de i et de s, les rayons de différentes couleurs seront toujours entre eux dans les mêmes rapports : par conséquent la teinte résultante sera toujours la même, seulement l'intensité variera avec le facteur $\sin 2i \sin 2(i - s)$. Cela suppose cependant que le terme variable est positif; s'il était négatif, la teinte totale se composerait d'une certaine quantité de lumière blanche et de la teinte complémentaire à celle qui résulte du terme négatif : car, dans ce cas, le premier terme est toujours plus grand que le second, attendu que l'intensité de la lumière ne peut pas être négative, et qu'il existera toujours assez de lumière blanche pour produire la teinte complémentaire à celle qui résulte du deuxième terme. C'est ce qu'on peut d'ailleurs facilement démontrer directement. Prenons d'abord la première formule : le second terme ne sera négatif que pour s plus grand que i; or, comme le dernier facteur ne peut pas être négatif, et que sa plus grande valeur est 1, il suffit de démontrer qu'on a toujours $\sin^2 s > \sin 2i \sin 2(s - i)$; mais le maximum du deuxième facteur a lieu pour $2i = s$, car, si on pose $2i = s + x$, il vient $\sin(s + x) \sin(s - x)$, qui reste le même quand on change x en $-x$. Ainsi $2i = s$ correspond à un maximum ou à un minimum; et c'est évidemment un maximum, car le produit

$$\sin(s + x) \sin(s - x) = \sin^2 s - \sin^2 x,$$

mais alors l'intensité devient nulle. Pour la deuxième formule, le deuxième terme est négatif quand i est $>$ que s; alors, i étant quelconque, la plus grande valeur a lieu quand $s = 0$, elle est alors $\sin^2 2i < 1$, tandis qu'on a $\cos^2 s = 1$. Remarquons maintenant que le second terme change de signe toutes les fois que l'image devient blanche, par conséquent cette image change aussi de teinte.

5° Si on suppose s constant et égal à 0° ou à 90°, le coefficient du second terme des intensités des images devient $\sin^2 2i$; il ne change plus de signe, et par conséquent chaque image conserve la même teinte; mais une des images disparaît pour $i = 0$, et $i = 90^\circ$, $i = 180^\circ$.

Digitized by Google

C'est l'image extraordinaire dans le premier cas, et l'image ordinaire dans le second : alors l'autre image est blanche ; le maximum d'éclat a toujours lieu pour $i = 45°$.

6° La lumière incidente doit être polarisée : car, si elle ne l'était pas, on pourrait la considérer comme formée de deux faisceaux d'égale intensité, polarisés dans deux plans rectangulaires, et chaque image résulterait de la superposition de deux dont les intensités seraient complémentaires, non pas parce que l'une renfermerait l'angle i et l'autre $90 + i$, ce qui ne les changerait en rien, mais parce qu'en vertu du principe exposé précédemment, un des deux systèmes serait en retard d'une demi-longueur d'ondulation, et qu'alors, le terme variable disparaissant, la somme des intensités serait l'unité, quelle que fût d'ailleurs la différence de marche.

7° Si, la lame étant éclairée par de la lumière homogène, i et s restant les mêmes, on augmentait progressivement son épaisseur, le dernier facteur du second terme de l'expression des intensités reprendrait périodiquement les même valeurs aux accroissements d'épaisseurs qui correspondraient à une différence de marche d'un nombre entier de longueurs d'ondulation.

8° Par les mêmes raisons que pour les anneaux colorés produits par les lames minces, les couleurs ne se manifesteront qu'autant que les épaisseurs des lames cristallisées seront comprises entre certaines limites.

1591. *Polarisation apparente de la lumière homogène qui sort de la lame mince.* Reprenons les formules générales, et supposons que la différence de marche des deux rayons soit égale à un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation. $(o - e) : \lambda$ sera un nombre entier, $\sin^2 \pi (o - e) : \lambda$ sera nul, et les intensités des deux images deviendront :

image extraordinaire. . . . . $\sin^2 s$,
image ordinaire. . . . . $\cos^2 s$;

l'image extraordinaire disparaît quand $s = 0$, et l'image ordinaire quand $s = 90°$.

Si $(o - e)$ est égal à un nombre impair de demi-longueurs d'ondulation, $\sin^2 (o - e) : \lambda$ devient égal à l'unité, et les intensités des deux images deviennent

image extraordinaire. . . . . $\sin^2 s + \sin 2i \sin 2(i - s)$,
image ordinaire. . . . . $\cos^2 s - \sin 2i \sin 2(i - s)$;

l'image extraordinaire disparaît pour $s = 2i$, et l'image ordinaire pour $s = 2i + 90°$. Ainsi la lumière homogène qui sort de la lame mince produit les mêmes apparences que si elle était polarisée dans le plan primitif ou dans l'azimut $2i$, suivant que la différence de marche est égale à un nombre pair ou à un nombre impair de demi-longueurs d'ondulations. En outre, dans le cas particulier ou $i = 45°$, l'ensemble de la lumière paraît complétement dépolarisé quand la différence de marche est égale à un nombre impair de quarts d'ondulation, car alors les intensités des images sont toujours égales entre elles et à $1/2$, quel que soit s. En effet, dans ce cas

$$\sin^2 \pi (o - e) : \lambda = \frac{1}{2},$$

et les intensités des deux images deviennent :

image extraordinaire. . . . . $\sin^2 s + \frac{1}{2} \cos 2s = \frac{1}{2}$,

image ordinaire . . . . . $\cos^2 s - \frac{1}{2} \cos 2s = \frac{1}{2}$.

1592. Pour vérifier ces conséquences de la théorie on pourrait employer des plaques minces de différentes épaisseurs, déterminées de manière que, pour certains rayons, les différences

Digitized by Google

de marches fussent d'un nombre pair ou impair de longueurs d'ondulations. Mais Fresnel a disposé l'expérience de manière qu'avec deux lames seulement, on puisse vérifier à la fois les influences de toutes les épaisseurs.

Un rhomboïde de spath calcaire terminé par deux faces dressées avec soin et bien parallèles fut scié perpendiculairement à ces faces. On obtint ainsi deux rhomboïdes d'égale épaisseur ; ils furent placés l'un devant l'autre, de manière que les sections principales fussent perpendiculaires. Le système des deux rhomboïdes fut placé devant une glace verticale dépolie à la surface inférieure, et qui réfléchissait la lumière émanée d'un point lumineux sous l'angle de 35°. Ainsi là le système des deux rhomboïdes était traversé par un faisceau de lumière polarisé dans un plan horizontal. Les sections principales des rhomboïdes furent inclinées de 45° à l'horizon, et on observait les images avec un rhomboïde dont on pouvait faire varier à volonté l'inclinaison de la section principale. Il résulte de cette disposition que les rayons qui sortaient du second rhomboïde étaient polarisés parallèlement et perpendiculairement à sa section principale, que la différence de marche des rayons ordinaires et extraordinaires dans les deux rhomboïdes était exactement compensée, et que les rayons émergents ordinaires et extraordinaires devaient faire un angle sensible à cause de la grande épaisseur des rhomboïdes. Cependant, comme nous l'avons déjà vu, ces rayons ne produisent pas de franges, parce qu'ils sont polarisés dans deux plans rectangulaires ; mais si on reçoit la lumière à travers un troisième rhomboïde, les rayons étant ramenés à un même plan de polarisation, on aperçoit deux systèmes de franges. Chacun d'eux est polarisé, l'un dans le plan de la section principale du deuxième rhomboïde, l'autre dans un plan perpendiculaire, comme il est facile de s'en assurer en faisant tourner la section principale du troisième rhomboïde : une des images disparaît lorsque cette section principale est parallèle ou perpendiculaire à celle du second. Supposons que la section principale du troisième rhomboïde soit fixée à 45° sur celle des deux premiers, c'est-à-dire parallèlement au plan primitif, circonstance qui produit les franges les plus brillantes, parce qu'alors chacun des deux faisceaux sortant du deuxième rhomboïde se partage également entre les images ordinaires et les images extraordinaires. Considérons maintenant les points correspondants des deux groupes de franges, et d'abord ceux qui en occupent le centre et qui répondent à des chemins égaux parcourus par les deux faisceaux : il est brillant dans l'image ordinaire et noir dans l'image extraordinaire. Si on fait tourner la section principale du rhomboïde, la lumière reparaît graduellement au centre des franges de l'image extraordinaire et s'affaiblit en même temps au centre de l'autre. Les intensités sont égales quand la section principale du rhomboïde fait un angle de 45° avec le plan primitif de polarisation, et le centre de l'image ordinaire devient complétement obscur quand la section principale est perpendiculaire au plan primitif. Ainsi la réunion des lumières qui forment les centres des images présente toutes les propriétés d'une polarisation complète suivant le plan horizontal. Si on considère maintenant les points qui correspondent à une différence de chemin d'un quart d'ondulation dans la marche des faisceaux, on reconnaîtra qu'ils conservent toujours les mêmes intensités dans les deux images quand on fait tourner le rhomboïde, et que la lumière se comporte comme si elle était complétement dépolarisée. Si on passe aux points qui répondent à une différence de marche d'une demi-ondulation, ils sont complétement noirs dans l'image ordinaire et brillants dans l'image extraordinaire lorsque la section principale du rhomboïde est horizontale ; et quand elle est verticale, c'est le contraire qui a lieu : ainsi la lumière totale de ces points est polarisée verticalement. En continuant à parcourir les divers points d'interférence des deux faisceaux lumineux, on trouve que la réunion de leur lumière est polarisée suivant le plan horizontal, c'est-à-dire parallèlement au plan primitif de polarisation, quand leur différence de marche est nulle ou égale à un nombre pair de demi-longueurs d'ondulation, et que la lumière totale est polarisée suivant le plan vertical, qui est ici l'azimut $2i$ quand la différence de marche est égale à un nombre impair de demi-ondulations, et qu'enfin dans tous les points intermédiaires la polarisation n'est que partielle, c'est-à-dire que pour une position quelconque de la section principale du rhomboïde, aucune des deux images ne disparaît.

Si, en laissant toujours les sections principales des deux premiers rhomboïdes perpendiculaires entre elles, on fait varier l'inclinaison des sections principales sur le plan primitif de polarisation dans toutes les positions du système, les lignes des franges qui répondent à une différence de

Digitized by Google

marche d'un nombre pair ou impair de demi-ondulations sont polarisées parallèlement au plan primitif ou dans l'azimut $2i$.

Les lames minces cristallisées présentent exactement les mêmes phénomènes ; mais quand leur épaisseur est trop petite pour que les faisceaux émergents aient une divergence sensible, il faut les éclairer par la lumière d'un point réfléchie sur deux miroirs légèrement inclinés entre eux et disposés de manière que l'angle de réflexion diffère peu de celui qui correspond à la polarisation complète.

1593. *Effets produits par la superposition de plusieurs lames.* Supposons d'abord que les sections principales des lames soient parallèles, chaque rayon, en traversant une des lames, conservera son plan de polarisation. Par conséquent, les intensités des faisceaux émergents seront les mêmes que si la lumière n'avait traversé qu'une seule lame ; mais la différence des chemins sera égale à la somme des différences correspondantes à chaque lame. Si les sections principales étaient les unes parallèles, les autres perpendiculaires, la même chose aurait encore lieu ; mais ce serait tantôt le rayon ordinaire, tantôt le rayon extraordinaire d'une lame qui traverserait extraordinairement la suivante.

S'il n'y avait que deux lames de même nature, et si les sections principales étaient parallèles, il est évident que les effets seraient les mêmes que si la lumière traversait une seule plaque dont l'épaisseur serait égale à la somme des épaisseurs des deux lames ; et si les sections principales étaient perpendiculaires, les effets seraient les mêmes que si la plaque avait une épaisseur égale à la différence des épaisseurs des deux lames. On peut alors avec des plaques épaisses croisées produire les couleurs qu'on obtient par une seule lame mince.

Si les deux lames superposées étaient de nature différente, les sections principales parallèles ou croisées, les différences de vitesse des rayons ordinaires et extraordinaires étant dans le même sens ou en sens contraire, en désignant par $o - e$ et $o' - e'$ les différences de marche dans la première et la deuxième, il est évident que l'effet produit correspondrait à une lame pour laquelle la différence des marches serait $(o - e) \pm (o' - e')$.

Supposons maintenant que les lames soient en nombre quelconque, de nature différente, et que les sections principales soient aussi inclinées entre elles d'une manière quelconque : les intensités des faisceaux polarisés parallèlement et perpendiculairement aux sections principales des lames successives s'obtiendront comme dans le cas d'une seule lame ; mais le nombre des faisceaux qui constitueront les images définitives croîtra avec le nombre des lames. Il est facile de voir que, pour chaque nouvelle lame, le nombre des faisceaux polarisés suivant la section principale ou perpendiculairement, sera double de ceux qui constituaient les images ordinaires et extraordinaires de la lame précédente, puisque, en général, chacun des deux faisceaux d'une lame entre comme partie constituante dans l'image ordinaire et extraordinaire de la lame suivante. Nous avons vu que, pour une seule lame, ces faisceaux sont au nombre de deux ; pour deux lames ils seraient au nombre de quatre, et ainsi de suite. Chacun de ces faisceaux n'ayant pas traversé le système des lames avec la même vitesse, ils seront en général en retard les uns sur les autres d'une certaine quantité, qu'on calculera facilement quand on connaîtra les épaisseurs des lames et les vitesses ordinaires et extraordinaires perpendiculairement à leurs faces. Alors pour obtenir la résultante de chacun des systèmes d'ondes qui constituent les images ordinaires et extraordinaires finales, il faudra calculer les résultantes successives. Tous ces calculs seraient très-longs, mais ne présenteraient aucune difficulté.

1594. *Coloration des plaques inclinées sur le faisceau incident.* Si une plaque mince était inclinée sur le faisceau incident, rien ne serait changé, si ce n'est l'épaisseur et la différence des vitesses avec lesquelles les rayons ordinaires et extraordinaires la traversent, car les faisceaux émergents reprendraient leur parallélisme à la sortie. Il est facile de voir que l'influence de l'inclinaison variera suivant la position des axes optiques : tantôt l'inclinaison diminuera la différence des vitesses, tantôt elle l'augmentera ; et, comme l'effet de l'inclinaison est d'augmenter l'épaisseur du cristal traversé par la lumière, l'effet final sera celui qu'on obtiendrait si la lumière traversait perpendiculairement la plaque, dont l'épaisseur serait diminuée ou augmentée.

1595. *Coloration des plaques par la lumière convergente.* Jusqu'ici nous avons supposé que le faisceau de lumière qui traversait la lame correspondait à une onde plane : alors tous les points de la lame se comportaient de la même manière, et la teinte était uniforme. Suppo-

Digitized by Google

sons maintenant que la lumière qui traverse la lame forme un large cône dont le sommet soit dans l'œil ; et pour commencer par le cas le plus simple, supposons que la plaque mince soit à un axe, et que l'axe soit perpendiculaire aux faces de la lame et parallèle à l'axe du cône de lumière.

1596. Soient *MN* (*fig.* 933) la plaque perpendiculaire à l'axe, *PP'* le plan primitif de polarisation, et supposons d'abord que la section principale de la tourmaline soit parallèle à *PP'* : dans ce cas on apercevra seulement l'image extraordinaire. Considérons un point *m* de la plaque : les rayons qui en sortiront seront polarisés suivant *mo* et *pq*, car *mo* représente pour le point *m* la direction de la section principale. Reprenons la formule qui représente l'intensité du rayon extraordinaire, et pour l'appliquer au cas dont il s'agit faisons $s = o$, elle deviendra

$$\sin^2 2i \sin^2 \pi \left(\frac{o - e}{\lambda}\right).$$

Cette expression devient nulle, quelle que soit la différence des chemins, quand $i = 0$ ou $i = 90°$. Ainsi il n'y aura pas de lumière propagée dans la direction des lignes *PP'* et *CC'*. Cette expression devient aussi nulle, quel que soit i, quand $(o - e) : \lambda$ est égal à 1, 2, 3, 4, etc. ; mais les différences de chemins sont les mêmes pour les rayons également inclinés sur l'axe, et cette différence des chemins augmente à mesure que les rayons sont plus inclinés, et parce que ces rayons traversent une plus grande épaisseur du cristal, et parce que la différence des vitesses des deux rayons augmente à mesure qu'ils s'inclinent davantage sur l'axe (*fig.* 934). Ainsi l'image renfermera une série de bandes obscures circulaires concentriques. Remarquons maintenant que, quand $(o - e) : \lambda$ reste constant, ce qui arrive pour les différents points d'un cercle concentrique au point *o*, l'intensité de la lumière est à son maximum quand $i = 45°$, et qu'elle décroît depuis cette limite jusqu'à $i = 0$ et $i = 90°$. Aussi les bandes brillantes interposées entre les cercles obscurs ont des intensités croissantes depuis $i = 0$ et $i = 90°$ jusqu'à $i = 45°$. Si maintenant on suppose que la lumière incidente soit blanche, comme les anneaux de différentes teintes n'auront pas les mêmes positions, leur surperposition produira des anneaux irisés dont le système sera coupé par une croix noire.

Si la section principale de la tourmaline était perpendiculaire au plan primitif de polarisation, l'image serait complémentaire, et par conséquent elle serait coupée par une croix blanche; et si on suppose que la section principale de la tourmaline passe graduellement de la première à la dernière position, la première image se transformera graduellement dans la seconde. On retrouve ainsi par la théorie toutes les particularités des phénomènes.

Il résulte de cette explication que les anneaux formés par les cristaux à un axe sont les mêmes, qu'ils soient positifs ou négatifs ; les teintes y sont distribuées de la même manière. Mais quand on superpose deux plaques perpendiculaires à l'axe, il est évident que l'effet produit sera égal à la somme ou à la différence des effets produits par chacune d'elles, suivant que les plaques appartiendront à des cristaux de même signe ou de signe contraire. Il résulte de là une méthode très-simple pour reconnaître le signe d'un cristal, il suffit de placer une plaque mince du cristal perpendiculaire à l'axe sur une plaque de chaux carbonatée aussi perpendiculaire à l'axe, et d'observer si, par la superposition, l'effet produit est le même que celui qui résulterait d'une augmentation ou d'une diminution d'épaisseur du premier cristal; c'est-à-dire si les diamètres des anneaux diminuent ou augmentent; dans le premier cas le cristal sera négatif, et il sera positif dans le second.

Si l'axe optique de la lame mince n'était point perpendiculaire aux faces, les différences des vitesses des deux rayons ne seraient plus les mêmes sous des inclinaisons égales sur la normale, et les lignes isochromatiques ne seraient plus circulaires.

Dans ce cas, et dans celui plus général où, le cristal étant à un axe ou à deux axes, les axes sont disposés d'une manière quelconque, la détermination des courbes isochromatiques serait un problème compliqué, mais qu'on parviendrait certainement à résoudre en suivant les principes que nous avons développés, en supposant que les vitesses des deux rayons des différentes teintes soient connues pour toutes les directions.

1597. Les couleurs développées par la chaleur, la trempe et la compression, n'ont certainement pas une autre origine que l'inégalité d'élasticité dans les différentes directions. Une

Digitized by Google

expérience qui met ce rapprochement hors de doute, c'est l'identité des résultats qu'on obtient avec une plaque circulaire trempée, ou uniformément comprimée dans tous les points de la circonférence, avec ceux des plaques des cristaux à un axe taillées perpendiculairement à l'axe.

Polarisation circulaire.

1598. Fresnel a donné une théorie très-ingénieuse de ce phénomène. Voici en quoi elle consiste : Considérons une molécule d'éther vibrant sous l'influence d'ondes polarisées; elle oscillera comme un pendule autour de sa position primitive, et sa vitesse à chaque instant sera donnée par la formule

$$v = a \sin 2\pi t,$$

a étant sa vitesse maximum. Mais la vitesse étant le rapport entre l'accroissement de l'espace parcouru et l'accroissement du temps on aura

$$v = dx : dt.$$

Et si on compte les chemins à partir de la position de repos, comme les temps sont toujours comptés à partir de l'extrémité de l'oscillation, les accroissements du chemin parcouru et du temps seront de signe contraire, et nous aurons

$$-\frac{dx}{dt} = a \sin 2\pi t, \quad \text{d'où} \quad x = \frac{a}{2\pi} \cos 2\pi t. \qquad (a)$$

Si la même molécule d'éther était soumise à l'action d'un autre système d'ondes de même longueur, ayant une intensité a', polarisée dans un plan perpendiculaire, et en retard sur la première d'une quantité c, en désignant par y la distance de la molécule à sa position primitive, si elle était seulement soumise à l'influence de ce second système d'ondes, on aurait de même

$$y = \frac{a'}{2\pi} \cos 2\pi (t - c); \qquad (b)$$

et pour obtenir l'équation de la trajectoire que parcourra la molécule d'éther sous l'influence des deux systèmes d'ondes, il suffit évidemment d'éliminer le temps t entre les deux équations (a) et (b). En effectuant les calculs, on tombe sur une équation du quatrième degré. Mais si on suppose que $c = 1/4$, c'est-à-dire qu'un des deux systèmes d'ondes soit en retard d'un quart d'ondulation, il viendra

$$\cos 2\pi (t - c) = \cos \left(2\pi t - \frac{\pi}{2}\right) = \sin 2\pi t, \text{ et } y = \frac{a'}{2\pi} \sin 2\pi t; \qquad (b')$$

les équations (a) et (b') donnent alors

$$4\pi^2 a^2 y^2 + 4\pi^2 a'^2 x^2 = a^2 a'^2,$$

équation d'une ellipse dont les axes sont les amplitudes d'oscillation des deux systèmes d'ondes divisées par 2π.

Si les intensités a et a' sont égales, l'équation de la trajectoire devient

$$y^2 + x^2 = \frac{a^2}{4\pi^2}.$$

Pour déterminer les vitesses avec lesquelles la molécule d'éther parcourt ces trajectoires, il faut évidemment faire la somme des composantes parallèles à la tangente des vitesses connues parallèlement aux axes. En considérant le cas général où la trajectoire est une ellipse, on trouve une formule assez compliquée, qui indique que la vitesse est variable, mais qu'elle

Digitized by Google

redevient la même quand la molécule est de retour au même point. Quand la trajectoire est circulaire, les cosinus des angles de la tangente avec les axes des x et des y sont représentés par $2\pi y : a$ et $2\pi x : a$, et la vitesse V devient

$$V = \frac{2\pi}{a} \times \frac{a}{2\pi} \sin 2\pi t \times a \sin 2\pi t + \frac{2\pi}{a} \cdot \frac{a}{2\pi} \cos 2\pi t \times a \cos 2\pi t = a.$$

Quant au sens du mouvement de rotation, il est évident qu'il changerait si l'onde qui est en avance sur l'autre d'un quart d'ondulation reculait de manière à être en arrière de la même quantité.

Il résulte de tout ce que nous venons de dire que, *si deux systèmes d'ondes polarisées dans deux plans rectangulaires ont une différence de marche égale à un quart d'ondulation*, les molécules d'éther décrivent des ellipses autour de leur position initiale, et des cercles quand les ondes ont la même intensité; que ces petites trajectoires sont parcourues pendant la durée d'une vibration avec une vitesse variable quand elles sont elliptiques, et avec une vitesse constante quand elles sont circulaires. Il est évident que dans ces nouvelles espèces d'ondes le plan de polarisation tourne et effectue une révolution complète dans la durée d'une vibration.

1599. Examinons maintenant les propriétés dont ces nouvelles ondes doivent jouir, en partant de leur constitution. Si on recevait un système d'ondes polarisées circulairement sur une lame de verre et sous l'incidence de la polarisation complète, il est évident que, quelle que fût la direction du plan de réflexion, l'image conserverait toujours la même intensité : car dans un temps excessivement court il se présenterait des ondes polarisées dans tous les azimuts possibles, et on obtiendrait le même effet que si le rayon était formé de lumière ordinaire. Si un faisceau de lumière polarisée circulairement était reçu perpendiculairement sur un cristal biréfringent, l'onde polarisée se décomposerait, et, pour comprendre facilement le résultat de cette décomposition, remplaçons ce système d'ondes par les deux systèmes d'ondes polarisées rectilignement qui l'ont produit. Ces deux systèmes d'ondes donneront chacune un système d'ondes polarisées dans la section principale et dans un plan perpendiculaire, et les images ordinaires et extraordinaires auront exactement la même intensité. En effet, si on désigne par i l'angle du plan de polarisation d'un des deux systèmes d'ondes avec la section principale du rhomboïde, les intensités des deux faisceaux polarisés dans la section principale et dans le plan perpendiculaire seront $a \sin i$ et $a \cos i$, et en calculant l'intensité de la lumière produite par l'onde résultante au moyen de la formule (1526), on trouve qu'elle est égale à a^2.

Mais si un faisceau polarisé circulairement traversait une plaque mince cristallisée, et si on recevait la lumière au moyen d'un analyseur quelconque, la lumière se colorerait comme si le faisceau incident était polarisé rectilignement, mais les teintes seraient différentes, et elles suivraient d'autres lois. En effet, nous avons vu que, quand deux faisceaux de lumière de même intensité polarisés à angle droit traversaient une mince plaque cristallisée, les images ordinaires et extraordinaires qu'on apercevait à travers un rhomboïde de chaux carbonatée étaient formées de la superposition de deux images complémentaires, et paraissaient blanches dans la lumière blanche ou de la même intensité dans la lumière homogène. Mais cela suppose nécessairement que les deux faisceaux incidents polarisés à angle droit n'ont aucune différence de marche, car, s'il n'en était pas ainsi, tout se passerait comme si la différence de marche n'existait pas et si pour un des faisceaux la lame mince avait une autre épaisseur.

Ainsi, les deux caractères de la lumière polarisée circulairement, au moyen desquels on peut facilement la distinguer de la lumière naturelle et de la lumière polarisée rectilignement, sont 1° de donner deux images d'égale intensité à travers un cristal épais biréfringent, ou une image d'une intensité constante à travers un analyseur quelconque; 2° de se colorer en traversant des lames minces cristallisées et ensuite un cristal biréfringent ou un analyseur quelconque.

1600. Vérifions maintenant si la lumière polarisée circulairement jouit de ces propriétés, et commençons par examiner comment nous pourrons la produire. La méthode la plus simple consiste à faire passer un faisceau de lumière polarisée à travers une plaque mince cristallisée, par exemple de mica, de manière que le plan de polarisation fasse un angle de 45° avec la section principale : les deux faisceaux émergents seront égaux, polarisés dans deux plans

Digitized by Google

rectangulaires, et la différence de marche dépendra de la nature et de l'épaisseur de la lame cristallisée; mais, en faisant tourner la lame autour d'une ligne perpendiculaire au plan primitif de polarisation, dans un sens ou dans l'autre, on parviendra toujours à rendre la différence de marche égale à un nombre impair de quarts d'ondulation, et par conséquent la lumière émergente sera polarisée circulairement. Or, on a trouvé que les rayons ainsi polarisés circulairement, et ceux qui l'ont été par d'autres moyens que nous indiquerons bientôt, jouissent tous des propriétés que la théorie leur assigne.

1601. Je dis maintenant qu'un faisceau de lumière polarisée rectilignement peut toujours être divisé en deux faisceaux égaux polarisés circulairement et en sens contraire.

En effet, la résultante de deux systèmes d'ondes ayant le même plan de polarisation est donnée par la formule

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2aa' \cos 2\pi \frac{c}{\lambda}.$$

Si on pose $a = a'$ et $\frac{c}{\lambda} = \frac{1}{4}$, il vient

$$\cos 2\pi \frac{c}{\lambda} = \cos \frac{\pi}{2} = 0, \quad A^2 = 2a^2 \quad \text{et} \quad a = \frac{A}{\sqrt{2}}.$$

Ainsi une onde d'une intensité A peut être décomposée en deux autres ayant une différence de marche d'un quart d'ondulation et dont les intensités sont $A : \sqrt{2}$. Et, pour que l'onde résultante occupe exactement le lieu de l'onde primitive, il est évident que les ondes composantes doivent être symétriquement placées en avant et en arrière, c'est-à-dire l'une en avant de $\lambda : 8$, et l'autre en arrière de la même quantité. Mais chaque faisceau polarisé peut être décomposé en deux autres égaux, polarisés dans deux plans rectangulaires entre eux, inclinés de 45° sur le plan primitif, et dont les intensités sont $a : \sqrt{2}$. Ainsi un même faisceau polarisé d'intensité a peut être décomposé en quatre faisceaux égaux, ayant pour intensité $a : 2$, deux en avant à une distance $\lambda : 8$, polarisés dans deux plans rectangulaires, inclinés de 45° sur le plan primitif, et deux en arrière de la même quantité, polarisés dans les mêmes plans; mais, en combinant ceux qui sont polarisés dans des plans rectangulaires, il en résulte évidemment deux faisceaux polarisés circulairement, l'un de droite à gauche, l'autre de gauche à droite.

1602. Il est d'ailleurs facile de reconnaître qu'une molécule d'éther qui serait soumise à ces deux systèmes d'ondes vibrerait dans un même plan. En effet, considérons une molécule d'éther O (*fig.* 955) soumise à l'influence de deux systèmes d'ondes égales polarisées circulairement, et se propageant avec la même vitesse : il est évident que, pour avoir la direction de la force qui sollicitera à chaque instant la molécule, il faudra par le point O mener des lignes parallèles aux directions des mouvements qu'aurait au même instant cette même molécule si elle n'était soumise qu'à l'action d'un seul des deux systèmes d'ondes. Soit $BACD$ le cercle que décrirait la molécule dans un sens ou dans l'autre si elle n'éprouvait que l'influence d'un des systèmes d'ondes, et soit AO la direction du mouvement dans le plan primitif de polarisation; soit B la position qu'occuperait la molécule à un certain instant sous l'influence du premier système; sous l'influence seule du second, parti en même temps de la surface du corps, la molécule serait en C, et on aurait $AB = AC$: alors, si par le point O on mène des droites parallèles aux tangentes au cercle aux points A et C, la résultante des forces égales dirigées suivant ces lignes sera celle qui sollicitera la molécule O; or cette résultante sera dirigée suivant OA, par conséquent le plan de polarisation ne sera pas changé.

Supposons maintenant qu'un des deux systèmes d'ondes, le premier, par exemple, se meuve plus vite que l'autre : au même instant, si la molécule d'éther était soumise seulement à l'influence du premier, elle serait en B (*fig.* 956), et en C si elle n'était sollicitée que par le second, et on aura $AB > AC$. La résultante des forces qui solliciteront la molécule O divisera comme précédemment, à cet instant et dans les instants suivants, l'angle BOC en deux parties égales; mais cette direction de la résultante fera avec AO un angle proportionnel à l'épaisseur du corps traversé en même temps par les deux ondes et à la différence des vitesses,

Digitized by Google

et la rotation du plan de polarisation sera égale à la moitié de la différence des arcs AB et AC.

Tout cela suppose que les vitesses de rotation en sens contraire sont égales ; mais c'est ce qui existe toujours, quelle que soit la vitesse de transmission, car la durée de la rotation est égale à celle d'une vibration du corps lumineux ; seulement, à mesure que la vitesse diminue, la longueur de l'onde polarisée circulairement diminue, mais elle emploie toujours le même temps pour passer à travers un plan perpendiculaire à sa direction.

1603. Il résulte de là que, s'il existe des corps qui propagent avec des vitesses différentes les ondes polarisées circulairement de droite à gauche et de gauche à droite, un rayon de lumière polarisée éprouvera à sa sortie une déviation de son plan de polarisation proportionnelle à l'épaisseur du corps. Voilà une explication bien simple des phénomènes singuliers que présentent le cristal de roche taillé perpendiculairement à l'axe et plusieurs liquides; mais Fresnel ne s'est point borné à cet aperçu, il a démontré, par des expériences précises, que dans le quartz un faisceau de lumière polarisée ordinaire se divise réellement en deux autres polarisés circulairement en sens contraire, et qui le parcourent avec des vitesses différentes. Il prit trois prismes de cristal de roche, A, B, C (*fig.* 957) ; les faces MN et MP du prisme A étaient inclinées entre elles de 152°, les axes optiques des trois prismes étaient parallèles entre eux et perpendiculaires aux faces QN et RP des prismes extrêmes; les prismes B et C avaient été tirés d'un cristal qui faisait tourner le plan de polarisation dans un sens contraire à celui qui avait servi à former le prisme A. Lorsqu'on fait traverser le système des trois prismes, parallèlement à l'axe, par un faisceau de lumière polarisée, on aperçoit deux images, et les deux faisceaux émergents sont polarisés circulairement. La disposition des trois prismes avait pour objet d'augmenter la déviation des deux faisceaux, déviation qui aurait été insensible dans un seul prisme. On se rendra facilement compte de l'influence de la disposition en question sur la déviation en suivant la marche du rayon dans les prismes. En effet, le rayon polarisé, en entrant par la face RP, se divise en deux rayons polarisés circulairement, l'un de gauche à droite, l'autre de droite à gauche : ces deux faisceaux doivent un peu diverger dans le premier prisme; mais la divergence est beaucoup augmentée en traversant le second, puisque le rapport des sinus d'incidence et de réfraction est égal au rapport des vitesses dans le premier et le second milieu ; à l'entrée dans le troisième la divergence augmente encore, parce que la différence des vitesses change encore de signe.

1604. Ainsi, de même que la lumière naturelle se divise en deux faisceaux polarisés, l'un parallèlement, l'autre perpendiculairement à la section principale, et que l'inégalité de vitesse de transmission constitue la double réfraction ordinaire, de même un faisceau polarisé rectilignement peut être considéré comme composé de deux faisceaux polarisés circulairement en sens contraire, et c'est l'inégalité de vitesse de la transmission de ces faisceaux qui constitue la double réfraction circulaire dont jouissent certains corps.

1605. L'indice de double réfraction circulaire peut facilement se déduire de l'angle de rotation du plan de polarisation pour une épaisseur donnée. En effet, nous avons vu précédemment que la rotation du plan de polarisation était moitié de l'arc dont un des deux systèmes était en avance sur l'autre ; or, si le retard était égal à la moitié d'une longueur d'ondulation, dans l'épaisseur de la lame il y aurait m longueurs d'ondulations du système qui va le plus vite, et $m + \frac{1}{2}$ ondulations de celui qui marche le plus lentement, et la déviation du plan de polarisation serait de 90°. Cela posé, représentons par e l'épaisseur du corps qui produirait une déviation de 90°, par λ et λ' les longueurs d'ondulations des deux rayons polarisés circulairement : on aura

$$e = m\lambda \text{ et } e' = \left(m \ \frac{1}{2}\right)\lambda',$$

et par suite

$$\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{e}{e' - \frac{1}{2}\lambda'}.$$

Pour toutes les substances connues, ce rapport diffère très-peu de l'unité : par exemple,

Digitized by Google

pour le quartz, celle de toutes les substances connues qui produit la plus grande déviation du plan de polarisation, et en supposant que la longueur d'ondulation du rayon rouge parallèlement à l'axe soit la valeur de λ', et prenant 3/2 pour l'indice de ce rayon, M. Babinet a trouvé que le rapport de λ à λ' était celui de 1,00005 à 1.

1606. La différence des vitesses de propagation des deux rayons polarisés circulairement en sens contraire, dans lesquels un rayon polarisé ordinaire se divise en pénétrant normalement dans une plaque de cristal de roche, taillée perpendiculairement à l'axe, ne subsiste que pour des inclinaisons très-petites autour de l'axe : aussi la rotation du plan de polarisation n'a lieu que pour la partie centrale, qui, dans la lumière blanche et une épaisseur suffisante du cristal, a une teinte uniforme, parce qu'alors les croix correspondantes aux différentes teintes se trouvent réparties dans toute l'étendue du champ. Les anneaux proviennent de lumière non polarisée circulairement, car pour cette partie du champ les croix noires et blanches subsistent, quoiqu'en général plus faibles que dans les cristaux où les croix se prolongent jusqu'au centre. On conçoit facilement, d'après cela, que le diamètre de la partie centrale d'une teinte uniforme est d'autant plus grande que les rayons qui arrivent à l'œil sont moins convergents. Lorsque la plaque est très-mince, les plans de polarisation n'ont tourné que d'un petit angle : alors les croix des différentes teintes diffèrent peu, et leur superposition partielle produit une croix colorée à branches larges dans la position de l'analyseur où un autre cristal perpendiculaire à l'axe donnerait une croix noire. Les effets singuliers qui se produisent quand on superpose deux plaques minces de quartz qui tournent en sens contraire n'ont point été étudiés. Il est évident qu'on pourrait obtenir la teinte des images ordinaires et extraordinaires de la partie centrale de plaques épaisses de quartz, en déterminant d'abord par les formules (*a*) et (*b*) les intensités des images de différentes teintes, en prenant pour i les valeurs qui leur correspondent, et en cherchant la teinte résultante par la méthode de Newton : toutes les images élémentaires étant complémentaires, il en sera de même des images finales.

1607. M. Airy a démontré, par le calcul et par l'expérience, que dans le quartz les deux rayons inclinés sur l'axe ne possédaient point la polarisation rectiligne, comme on l'avait cru jusqu'alors. Les rayons ont tous les deux, et pour toutes les inclinaisons sur l'axe optique, une polarisation elliptique, le grand axe étant pour l'un des rayons dans la section principale, et l'autre dans une direction perpendiculaire à ce plan; dans l'un le mouvement de rotation est dirigé vers la droite, et dans l'autre vers la gauche : le rapport des axes diminue à mesure que les rayons se rapprochent de l'axe, et la polarisation devient circulaire quand les rayons sont parallèles à l'axe (*Transactions de Cambridge*, 1832).

1608. *Interférence des rayons polarisés circulairement.* Lorsqu'on fait interférer des rayons égaux polarisés circulairement en sens contraire, on n'obtient pas de franges à l'œil nu, parce que, quelle que soit la différence des chemins, l'intensité de la lumière est constante : en effet, les deux rayons polarisés circulairement peuvent toujours être décomposés chacun en deux systèmes d'ondes polarisées rectilignement dans deux plans rectangulaires, et dont l'un est en avance sur l'autre d'un quart d'ondulation. Désignons par M et N les plans de polarisation, par a et a', b et b', les ondes élémentaires polarisées dans les plans M et N. a et b formeront le premier rayon polarisé circulairement, a' et b' le second; mais, comme les rayons sont polarisés en sens contraire, a est en avance sur a', et b' sur b, de $\lambda/4$. Supposons que le premier rayon prenne sur le second une avance de c longueurs d'ondulations, les rayons a et a' auront une différence de marche $c + 1/4$, et le rayon b aura une avance de $c - 1/4$: la résultante A des ondes a et a' sera donnée par l'équation

$$A^2 = a^2 + a'^2 + 2aa' \cos 2\pi \frac{c}{\lambda}.$$

Dans le cas dont il s'agit,

$$a = a', \quad c : \lambda = c + \frac{1}{4}, \quad \cos 2\pi \frac{c}{\lambda} = -\sin 2\pi\, c,$$

et par suite

$$A^2 = 2a^2 (1 - \sin 2\pi c).$$

Digitized by Google

Pour les rayons qui sont polarisés dans le plan N on trouverait de même

$$A'^2 = 2a^2 (1 + \sin 2\pi c).$$

Je dis maintenant que ces deux résultantes sont d'accord, c'est-à-dire qu'elles n'ont aucune différence de marche : en effet, rapportons les différences de marche au rayon a', le rayon a aura une différence de marche $c + 1/4$; mais, les ondes ayant la même intensité, la résultante sera au milieu de l'intervalle, et son excès de marche sera $c/2 + 1/8$. Pour le rayon b, il se trouvera en avance de b' de $c - 1/4$, et la résultante seulement de $c/2 - 1/8$; mais, comme b' est en avance sur b de $1/4$, l'avance de la résultante sur a' sera $c/2 - 1/8 + 1/4 = c/2 + 1/8$. Alors les résultantes n'ayant aucune différence de marche, la résultante finale s'obtiendra comme la résultante des forces ordinaires, et l'intensité de la lumière sera égale à la somme des carrés des intensités des ondes; or, cette somme est évidemment indépendante de c.

Mais, si on observait avec un prisme biréfringent l'espace où les rayons se croisent, lorsque la section principale serait parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation, une des deux images donnerait des franges, parce qu'une différence de marche de $1/2\ \lambda$ transforme les deux faisceaux polarisés circulairement en un seul polarisé rectilignement dans le plan primitif. En effet, d'après ce qui précède, les résultantes A et A' des ondes élémentaires polarisées dans les plans M et N seront toujours d'accord, quel que soit c, et la résultante finale des mouvements élémentaires divisera en deux parties égales l'angle des plans perpendiculaires aux plans de polarisation M et N quand les valeurs de A et de A' seront égales, c'est-à-dire quand la valeur de c sera telle, que $\sin 2\pi c = 0$; or, cela arrivera pour $c = 0$, et pour $c = 1/2$, $2/2$, $3/2$, etc. Ainsi, pour tous les points de l'espace où se croiseront des rayons égaux polarisés circulairement en sens contraire, pour lesquels la différence de marche sera un multiple quelconque pair ou impair de $1/2\ \lambda$, la lumière sera polarisée dans le sens du plan primitif de polarisation, et par conséquent ces points paraîtront obscurs dans l'image extraordinaire ou dans l'image ordinaire, suivant que la section principale du rhomboïde sera parallèle ou perpendiculaire au plan primitif de polarisation.

M. Babinet produit les phénomènes d'interférence dont il s'agit par une méthode très-simple : il place une lumière derrière une plaque percée d'une fente étroite, en avant une plaque de tourmaline destinée à polariser la lumière, à un mètre de l'ouverture une plaque de verre formant un prisme d'un angle très-voisin de 180° (*fig.* 851 *A*); deux petites lames de mica, placées au delà de la plaque de verre, polarisent circulairement et en sens contraire les deux faisceaux émergents. Pour que les deux faisceaux soient polarisés circulairement, on fait varier l'inclinaison des lames de mica jusqu'à ce que la lumière émergente donne deux images de même intensité à travers un rhomboïde, et, pour qu'ils soient polarisés circulairement en sens contraire, il suffit que les sections principales des lames de mica soient perpendiculaires. M. Babinet a proposé de mesurer les indices de réfraction circulaire par le déplacement des franges qui résulte de l'interposition d'une plaque perpendiculaire à l'axe, ou d'un tube terminé par deux glaces parallèles renfermant le liquide, et suivant la marche indiquée (1535). Cette méthode permet de mesurer des différences de vitesse qui seraient inappréciables par la déviation des prismes.

1609. *Effet produit par des réflexions totales.* Les formules qui représentent l'intensité du rayon réfléchi sont applicables pour toutes les incidences quand le second milieu est plus dense que le premier; mais, dans le cas contraire, elles ne peuvent s'appliquer que jusqu'à l'incidence qui produit une réflexion totale; au delà, ces formules deviennent imaginaires. Mais Fresnel, en interprétant de la manière la plus probable ce que l'analyse indiquait par ces formes imaginaires, a reconnu que la lumière polarisée et réfléchie totalement conservait son plan de polarisation quand le plan primitif de polarisation était parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion; mais que pour toute autre position du plan primitif, la lumière réfléchie peut toujours être représentée par deux faisceaux polarisés, l'un dans le plan de réflexion, l'autre dans une direction perpendiculaire, et qui diffèrent dans leur marche d'une certaine fraction d'ondulation qui dépend de l'angle d'incidence. Les deux faisceaux ont la même intensité quand le plan primitif de polarisation fait un angle de 45° avec le plan de réflexion. La différence de marche augmente depuis l'incidence où commence la réflexion complète, jusqu'à une certaine limite, et décroît ensuite jusqu'à l'incidence de 90°; l'angle sous lequel la

Digitized by Google

différence de marche est à son maximum dépend du rapport de réfraction des deux milieux en contact.

La différence de marche produite par une seule réflexion entre les deux faisceaux réfléchis, polarisés parallèlement et perpendiculairement au plan de réflexion, est une fraction d'ondulation représentée par $\frac{\varphi}{2\pi}$, φ étant déterminé par la formule

$$\cos\varphi = \frac{2n^2\sin^4 i - (n^2+1)\sin^2 i + 1}{(n^2+1)\sin^2 i - 1}.$$

Fresnel a vérifié ces formules en calculant l'angle d'incidence pour lequel la lumière incidente polarisée à 45° serait polarisée circulairement après deux, trois, quatre réflexions dans le verre, et quatre dans le verre lorsque pour les deux premières le verre est sec et qu'il est mouillé pour les deux dernières : l'expérience a parfaitement confirmé les indications de la théorie. Pour le verre de Saint-Gobin, dont Fresnel s'est servi, l'indice est 1,51; et l'angle d'incidence pour une dépolarisation complète après deux réflexions est de 48°,57′ ou 54°57′; pour trois réflexions l'incidence est de 43°,11′ ou 69°,12′; pour quatre réflexions l'incidence est de 40°,20′ ou 74°,42′; enfin pour les quatre réflexions, dont deux sur le verre mouillé, l'incidence est de 68°,27′. Les images ne sont blanches que pour les plus grandes incidences, attendu que, les plus petites étant trop voisines des limites où commence la réflexion totale pour les différents rayons colorés, les intensités relatives des rayons réfléchis ne sont plus les mêmes que dans la lumière blanche.

La lumière qui a été polarisée circulairement par un certain nombre de réflexions reprend exactement son plan primitif de polarisation par de nouvelles réflexions, sous le même angle, en même nombre, et dans un plan quelconque : ainsi, de la lumière qui a éprouvé le genre de modification dont il s'agit par deux réflexions reprend son état primitif après deux nouvelles réflexions ou quatre réflexions totales; après six elle retombe dans l'état où elle s'était trouvée après deux seulement, et ainsi de suite.

1610. On peut vérifier ces résultats pour le verre au moyen d'un parallélipipède *ABCD*, dont les angles dièdres obtus sont de 126°; lorsqu'on fait arriver perpendiculairement sur la face *BC* un rayon polarisé *LM*, il rencontre la face *AB* sous un angle de 54°; le rayon est réfléchi en totalité, il éprouve une seconde réflexion totale en *N* sur la face opposée, et sort perpendiculairement à la face *AD*; en dirigeant le parallélipipède de manière que les plans de réflexion soient inclinés de 45° sur le plan primitif de polarisation, le faisceau émergent est polarisé circulairement. Lorsqu'on place un autre parallélipipède de verre de mêmes dimensions sur la face *AD* du premier, le faisceau émergent, après les deux nouvelles réflexions totales, reprend une polarisation complète dans un certain plan, quelle que soit la position du second plan de réflexion, et le plan de polarisation du rayon émergent coïncide avec le plan primitif de polarisation quand le plan de réflexion dans le second prisme coïncide avec le premier.

Fresnel a démontré que ce mode de polarisation circulaire était identique avec celui que produit le cristal de roche dans la direction de son axe : car, en soumettant à deux réflexions totales et successives les deux rayons émergents des trois prismes de cristal de roche (*fig.* 937), après leur émergence ils se sont trouvés polarisés, l'un à 45° à droite du plan de réflexion, l'autre à 45° à gauche.

1611. *Polarisation circulaire produite par la réflexion sur les métaux.* Tous les faits que nous allons rapporter ont été découverts par M. Brewster. Pour les observer il se servait de deux plaques métalliques planes et très-polies, d'environ un pouce de longueur et d'un demi-pouce de largeur, placées parallèlement, dont on pouvait faire varier à volonté la distance, et par suite le nombre des réflexions qu'un rayon de lumière, sous une même incidence, éprouvait avant de sortir de l'intervalle des plaques. Voici les résultats auxquels il a été conduit :

1° Lorsqu'on emploie de la lumière naturelle, il y a toujours une certaine quantité de lumière polarisée dans le plan d'incidence; cette quantité augmente avec le nombre des réflexions : pour l'acier sous une incidence de 75°, la lumière est complétement polarisée après huit réflexions; pour l'argent sous une incidence de 75°, après trente-six réflexions seulement.

2° Lorsque le rayon incident est polarisé dans un plan parallèle ou perpendiculaire au plan

Digitized by Google

de réflexion, le rayon réfléchi est polarisé en totalité dans le même plan ; mais, dans toute autre position du plan de polarisation du rayon incident, la lumière réfléchie éprouve une modification analogue à celle qu'elle éprouve par la réflexion totale en dedans du verre.

3° Lorque le plan de polarisation fait un angle de 45° avec le plan de réflexion, sous une certaine incidence, différente pour les différents métaux, le rayon est polarisé circulairement après 1, 3, 5, 7, etc., réflexions, et il est ramené à un même plan de polarisation après un nombre pair de réflexions ; mais le plan de polarisation du rayon réfléchi ne coïncide pas avec celui du rayon incident, et sa position varie avec le nombre des réflexions : l'angle qu'il forme avec le plan de réflexions diminue à mesure que le nombre de réflexions augmente, et devient nul après un certain nombre de réflexions.

Les angles d'incidence correspondants à la polarisation circulaire, après une seule ou un nombre impair de réflexions pour les différents métaux, sont les suivants :

Étain fondu.	78°,30′	Acier.	75°,00′
Mercure.	78°,27′	Bismuth.	74°,50′
Galène.	78°,10′	Argent pur.	73°,00′
Pyrite de fer.	77°,30′	Zinc.	72°,30′
Cobalt gris.	76°,56′	Étain battu.	70°,50′
Métal des miroirs . . .	76°,00′	Or des bijoux.	70°,45′
Antimoine.	75°,35′		

Le tableau suivant donne la position du plan de polarisation pour différents métaux après deux réflexions :

Argent pur.	39°,48′	Métal des miroirs. . . .	21°,00′
Argent commun. . . .	36°,00′	Zinc.	19°,10′
Or pur.	35°,00′	Acier.	17°,00′
Or des bijoux.	33°,00′	Pyrite de fer.	14°,00′
Étain fondu.	33°,00′	Antimoine.	16°,15′
Bronze.	32°,00′	Cobalt arsenical. . . .	13°,00′
Étain laminé.	31°,00′	Cobalt.	12°,30′
Cuivre.	29°,00′	Plomb.	11°,00′
Mercure.	26°,00′	Galène.	2°,00′
Platine.	22°,00′	Fer spéculaire	0°,00′
Bismuth	21°,00′		

Le tableau suivant donne les positions du plan de polarisation du rayon réfléchi, après un certain nombre de réflexions, pour l'acier et l'argent :

Nombre de réflexions.	Acier.	Argent.
2	— 17°,00′	— 38°,15′
4	+ 5°,22′	+ 31°,52′
6	— 1°,38′	— 26°, 6′
8	+ 0°,30′	+ 21°, 7′
10	— 0°, 9′	— 16°,56′
12	+ 8°, 3′	+ 13°,30′
18	— 0°, 0′	— 6°,42′
36	+ 0°, 0′	+ 0°,47′

La lumière naturelle pouvant être considérée comme composée de deux faisceaux égaux polarisés dans deux plans inclinés de 45° sur le plan des réflexions, on voit pourquoi la polarisation est complète dans le plan d'incidence après huit réflexions sur l'acier, et seulement après trente-six sur l'argent.

Digitized by Google

Pour des angles d'incidence plus grands ou plus petits que ceux qui produisent la polarisation circulaire après une seule réflexion, le rayon réfléchi peut être ramené à un même plan de polarisation après n, $2n$, $3n$, $4n$, etc., réflexions, n étant un nombre entier : par exemple, pour l'acier, sous les incidences

$$80°;\ 84°;\ 82°,20';\ 79°;\ 75°;\ 67°,40';\ 60°,20';\ 56°,25';\ 52°,20',$$

les nombres de réflexions qui ramènent le rayon réfléchi à un plan unique de polarisation, ou les valeurs de n, sont

$$6,\ 5,\ 4,\ 3,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6.$$

Lorsque le nombre des réflexions est pair, la moitié de ce nombre donne celui des réflexions auxquelles le rayon prend la polarisation circulaire ; lorsqu'il est impair, M. Brewster admet que la polarisation circulaire se produit lorsque le rayon a atteint la plus grande profondeur dans la plaque métallique.

M. Brewster considère l'angle d'incidence sous lequel les métaux réfléchissent, avec la polarisation circulaire, les rayons polarisés dont le plan de polarisation fait un angle de 45° avec le plan de réflexion, comme représentant l'angle de polarisation, et sa tangente comme la mesure de l'indice.

Dans la polarisation circulaire produite par la réfraction totale dans le verre, le rayon polarisé circulairement est ramené à un même plan de polarisation par le même nombre de réflexions sous le même angle, quelle que soit l'inclinaison du plan du second système de réflexions sur le premier ; mais, dans la polarisation circulaire produite par les métaux, l'angle de réflexion qui ramène le rayon à un même plan de polarisation varie avec l'angle des plans de réflexion. Cette considération a conduit M. Brewster à désigner sous le nom de *polarisation elliptique* la polarisation produite par les métaux ; mais il n'est point démontré que cette désignation a réellement la signification que nous lui avons assignée précédemment.

1612. *Réflexions sur le système des ondulations.* Il résulte de ce qui précède que, dans le système des ondulations, on parvient à expliquer les phénomènes et à en découvrir les lois, lois qui souvent sont si compliquées qu'il aurait été impossible de les reconnaître par la voie de l'expérience, et que, dans ce système, tout repose sur une seule hypothèse, savoir, que la lumière se propage par des ondulations : car le principe des interférences et celui d'Huyghens en sont des conséquences nécessaires, et la direction du mouvement ondulatoire de l'éther est démontrée par l'expérience. Si on considère en outre la grande variété de faits dont cette hypothèse rend compte avec une si admirable fidélité, et enfin que les conséquences les plus singulières de ce système, telles, par exemple, que la polarisation circulaire à la seconde surface des corps non cristallisés et les points singuliers de la surface des ondes ont été constatés par l'expérience, il est impossible de ne pas admettre ce système comme l'expression de la réalité.

Cependant il existe encore dans le système des ondulations quelques points obscurs, principalement l'origine même des vibrations transversales, et un grand nombre de phénomènes qui n'ont point été étudiés. Nous citerons la polarisation par réflexion sur les métaux et les corps biréfringents, l'absorption de la lumière par les corps opaques, et enfin la couleur propre des corps.

FIN.

Digitized by Google

ADDITIONS.

Conductibilité pour les courants électriques. En partant de la loi que la *conductibilité* des fils est proportionnelle à la section et en raison inverse de la longueur, et que la conductibilité de la pile elle-même peut être représentée par une certaine longueur de fil, on est conduit à plusieurs conséquences importantes, que nous croyons devoir développer.

Représentons par t l'intensité du courant, tel qu'il serait si la conductibilité totale du circuit était l'unité, c'est-à-dire si le circuit était formé d'un fil de la matière à laquelle on rapporte la conductibilité de tous les autres corps, qui aurait l'unité de longueur et l'unité de section ; représentons par l et r les longueurs du même fil qui produiraient le même effet que le fil réel qui réunit les extrémités de la pile, et la résistance que le courant éprouve en la traversant, de sorte que $l = Lsk$, L étant la longueur réelle du fil que traverse le courant, s sa section et k sa conductibilité : d'après cela, les intensités A et A' du courant, pour deux longueurs différentes l et l', seront

$$A = t : (l + r) \quad \text{et} \quad A' = t' : (l' + r),$$

équations d'où l'on pourra déduire r. D'après les expériences de M. Pouillet, en donnant à l des longueurs très-différentes, on obtient toujours la même valeur de r, ce qui vérifie l'exactitude du principe d'où nous sommes partis.

Considérons maintenant un circuit dont la longueur totale du fil, de l'unité de section et de conductibilité, y compris la résistance de la pile, soit L, et supposons qu'un fil de longueur l' soit fixé au circuit à deux points, distants de l, compté sur le circuit; désignons par F le courant primitif, par F' le courant après l'établissement du courant latéral, et par f et f' les courants qui traversent les longueurs l et l'. Le fil l, produit le même effet qu'un fil de longueur l ayant pour section $l : l'$, et les deux fils l et l' peuvent être remplacés par un seul ayant pour longueur l et pour section $1 + l : l'$, ou par un seul fil ayant l'unité de section et pour longueur

$$l : (1 + l : l') = ll' : (l + l').$$

Alors le circuit total sera $L - l + ll' : (l + l')$, et on aura

$$F' = \frac{FL(l + l')}{L(l + l') - l^2}, \quad f + f' = F' \quad \text{et} \quad \frac{f'}{f} = \frac{l}{l'},$$

équations d'où l'on déduira facilement

$$f = \frac{FLl'}{L(l + l') - l^2} \quad \text{et} \quad f' = \frac{FLl}{L(l + l') - l^2}.$$

Si on avait une pile renfermant n éléments égaux, en désignant par t l'intensité d'un seul pour un circuit ayant une conductibilité 1, par r la résistance de chaque élément, et par l la longueur du fil qui réunit les pôles; en supposant que chaque courant partiel subsiste sans être influencé par les autres, l'intensité du courant sera évidemment

$$\frac{nt}{nr + l}$$

Digitized by Google

Si les intensités et les résistances des éléments différaient, il faudrait remplacer nt par la somme des intensités des éléments, et nr par la somme des résistances. Cette expression fait voir que l'intensité diminue très-peu avec l, attendu que nr est très-grand. Pour les courants thermo-électriques, on peut supposer $r = 0$, et on retombe sur une valeur de l'intensité du courant qui indique que cette intensité est proportionnelle au nombre des éléments, et en raison inverse de la longueur du fil, comme cela devait être.

Si les éléments étaient réunis par les mêmes pôles, on aurait pour l'intensité du courant

$$\frac{nt}{r + l}.$$

On voit que l'intensité du courant variera avec la longueur l, beaucoup plus que pour une pile qui renfermerait n éléments, et d'autant plus que n sera plus grand.

Tout cela suppose que l'intensité des éléments est constante, et que les courants, par leur superposition dans le circuit, ne changent point sa faculté conductrice.

M. Pouillet a donné, sans les démontrer, des formules analogues beaucoup plus compliquées, mais qui, au fond, doivent être équivalentes, car elles sont fondées sur les mêmes principes. Plusieurs d'entre elles ont été vérifiées par des expériences nombreuses.

Nouvelle pile voltaïque. M. Faraday vient d'imaginer une nouvelle pile voltaïque qui paraît beaucoup plus avantageuse que toutes celles qui ont été employées jusqu'ici. La pile de M. Faraday se compose de plaques de cuivre et de zinc disposées de la même manière que dans la pile de Wollaston; mais les plaques de zinc sont en métal laminé, très-voisines des plaques de cuivre environnantes, 1/10 de pouce; les plaques de cuivre des éléments contigus ne sont séparées que par une feuille de papier, et tout le système des éléments est plongé dans un même vase renfermant de l'eau acidulée. Cet appareil produit les mêmes effets qu'une pile de Wollaston ordinaire renfermant le même nombre d'éléments de mêmes dimensions, et, pour le même effet chimique, il y a moins de zinc dissous. En donnant à la caisse une section convenable parallèlement aux plaques, fixant de chaque côté de l'ouverture des rebords assez larges, et supportant la caisse par des axes métalliques communiquant avec les plaques extrêmes, et reposant sur des coussinets métalliques, on pourra prendre ces dernières pour les pôles, et, en faisant tourner la caisse d'un quart de tour, on sortira la pile liquide. Cette pile est, comme on voit, d'un service facile, et elle économise du zinc et de l'acide; d'ailleurs, comme elle exige peu de liquide, on peut, sans grandes dépenses, le renouveler souvent. Cent parties d'eau renfermant 2,25 d'acide sulfurique et 2 d'acide nitrique, ou 4 d'acide nitrique, ne produisent point de dégagement de gaz dans la pile.

Anneaux colorés. Nous avons omis, en parlant du système des ondulations, de rapporter une expérience très-remarquable de M. Airy, qui démontre avec la dernière évidence la nécessité de l'intervention des rayons réfléchis à la première et à la seconde surface de la lame mince dans la formation des anneaux. Voici en quoi consiste cette expérience. Une lentille d'un très-long foyer fut placée sur une plaque métallique, et la lentille fut éclairée par un faisceau de lumière blanche polarisée perpendiculairement au plan de réflexion, et incliné sous l'angle de polarisation complète sur le verre. Dans cette position du rayon incident il n'y avait point de lumière réfléchie à la première et à la seconde surface de la lentille, et il ne se formait point d'anneaux; ils paraissaient si on changeait l'angle d'incidence ou le plan de polarisation du rayon incident.

Polarisation circulaire des quartz. Certaines variétés de cristaux de quartz renferment des faces qui prennent naissance sur les arêtes du prisme, mais sont inclinées sur l'axe et inégalement sur les deux faces adjacentes du prisme; ces faces portent le nom de *plagiédrales*. M. Herschell a reconnu par de nombreuses expériences que la rotation du plan de polarisation a lieu dans le sens de l'inclinaison de ces faces.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

RENFERMÉES DANS LE SECOND VOLUME.

IIe PARTIE. — FLUIDES IMPONDÉRABLES (*Suite*).

Pages.

CHAPITRE II. — *Magnétisme.*

§ 1. Phénomènes généraux. 5
§ 2. Lois des attractions et des répulsions magnétiques. 9
§ 3. Détermination de la force magnétique d'un aimant. . . . 10
§ 4. Distribution du magnétisme dans un barreau aimanté. . . 12
§ 5. Théorie du magnétisme. 14
§ 6. Aimantation. 15
§ 7. Action des aimants sur tous les corps. 24
§ 8. Effets magnétiques des corps en mouvement. 25
§ 9. Magnétisme terrestre. 28

CHAPITRE III. — *Électricité statique.*

§ 1. Phénomènes généraux. 40
§ 2. Appareils électriques. 57
§ 3. Développement de l'électricité par la pression. 77
§ 4. Circonstances du développement de l'électricité. 79
§ 5. Électricité atmosphérique. 88

CHAPITRE IV. — *Électricité développée par la chaleur dans les cristaux.* . . . 97

CHAPITRE V. — *Électricité dynamique.* . . . . . .

§ 1. Phénomènes généraux 99
§ 2. Effets produits par la tension des piles. 105
§ 3. Effets mécaniques produits dans les corps par les courants . 107
§ 4. Action des courants les uns sur les autres et sur les aimants. 108
Action des courants les uns sur les autres. 109
Action de la terre sur les courants. 121
Action des courants et des aimants. 123
§ 5. Effets calorifiques produits par les courants. 144
§ 6. Effets chimiques produits par les courants. 146
§ 7. Effets produits par les courants sur les corps organisés. . . 155
§ 8. Courants d'induction. 158
§ 9. Courants thermo-électriques. 164
§ 10. Courants produits par l'électricité développée par le frottement. 171
§ 11. Électricité développée dans les actions chimiques. 172
§ 12. Conductibilité. 175
§ 13. Considérations générales sur l'électricité dynamique. . . . 180
§ 14. Poissons électriques. 185

CHAPITRE VI. — *Lumière.* 185

§ 1. Phénomènes généraux. 186
Transmission. . . . . *ib.*
Réflexion. 190
Réfraction. 196
Décomposition de la lumière par réfraction. 213

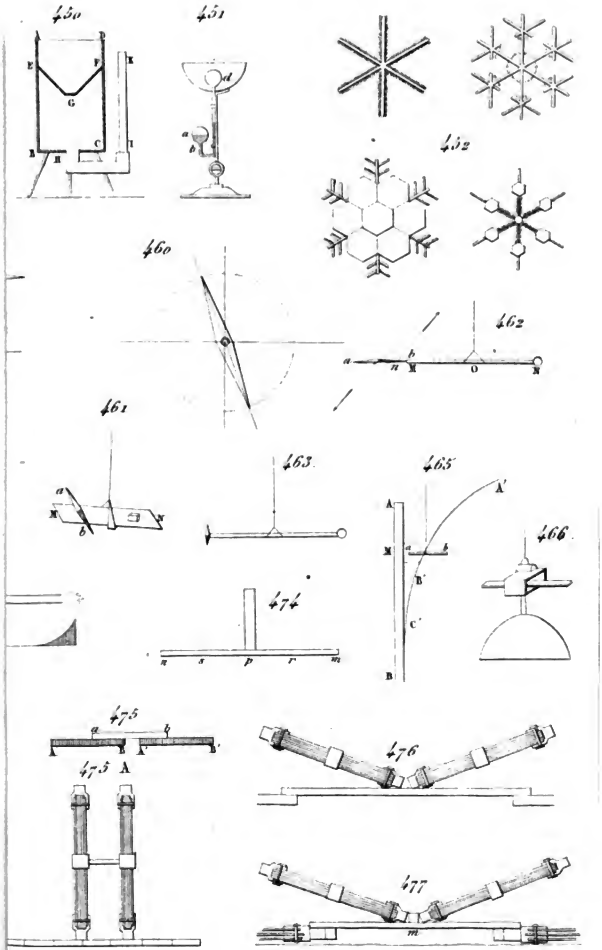
Digitized by Google

Pages.

§ 2. De la vision. 237
§ 3. Instruments d'optique. 246
§ 4. Anneaux colorés. 267
§ 5. Diffraction. 278
§ 6. Double réfraction. 287
§ 7. Polarisation. 298
§ 8. Coloration de la lumière polarisée. 307
§ 9. Polarisation de la chaleur. 319
§ 10. Météores lumineux. 329
§ 11. Sources de lumière. 329
§ 12. Système de l'émission. 331
§ 13. Système des ondulations. 339
Constitution des ondes. Principe des interférences. . . . *ib.*
Intensité. Réflexion. Réfraction. Dispersion. 346
Anneaux colorés. 350
Diffraction. 355
Polarisation. 362
Double réfraction. 376
Coloration de la lumière polarisée par les lames minces. . 384
Polarisation circulaire 398
Additions. 401

FIN DE LA TABLE.

Digitized by Google



Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google